

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavební mechaniky

Algoritmizace výpočtu jeřábové dráhy.

Program for calculating crane runway.

Student:

Bc. Martin Šangala

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lenka Lausová, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Šangala**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: **Algoritmizace výpočtu jeřábové dráhy.
Program for calculating crane runway.**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Závěrečná práce je zaměřena na navrhování ocelových konstrukcí jeřábových drah. V rámci diplomové práce student vypracuje program na výpočet jeřábové dráhy v tabulkovém procesoru Microsoft Excel nebo v programovacím prostředí Matlab. Výpočet by měl obsahovat posouzení pevnosti průřezů, klopení nosníku, boulení štíhlých stěn podle skupiny mezních stavů únosnosti, ověření mezních stavů použitelnosti a únavy. Program bude uplatněn na praktických příkladech.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] PILGR, M. Kovové konstrukce. Výpočet jeřábové dráhy pro mostové jeřáby podle ČSN EN 1991-3 a ČSN EN 1993-6.
- [2] MELCHER, J. a STRAKA, B. Kovové konstrukce. Konstrukce průmyslových budov.
- [3] ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI, 2006.
- [4] ČSN EN 1993-1-5 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn. Praha: ČNI, 2008.
- [5] ČSN EN 1993-1-8 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčníků. Praha: ČNI, 2006.
- [6] ČSN EN 1993-1-9 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-9: Únava. Praha: ČNI, 2006.
- [7] ČSN EN 1993-6 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 6: Jeřábové dráhy. Praha: ČNI, 2008.
- [8] ČSN EN 1991-3 (73 0035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 3: Zatížení od jeřábů a strojního vybavení. Praha: ČNI, 2008.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lenka Lausová, Ph.D.**

Datum zadání: 27.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015



doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 30.1. 2015

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 30.11. 2015

.....

podpis studenta

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na vytvoření algoritmu pro návrh a posouzení nosníku jeřábové dráhy podle současně platných norem. Program je vytvořen v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Složitější funkce a procedury jsou naprogramovány v jazyku Visual Basic for Applications. Stěžejní částí diplomové práce je návrh aplikace, která statikovi pomůže při výpočtu zatížení působícího na jeřábovou dráhu a při návrhu jejího průřezu. Uvedený program provede posouzení ověření mezních stavů únosnosti i použitelnosti a to pevnosti průřezu, klopení nosníku, boulení štíhlých stěn, posouzení na únavu a ověření limitních průhybů. K správnému pochopení funkce aplikace a pro usnadnění jejího použití byl v rámci práce vytvořen manuál, ve kterém jsou vysvětleny jednotlivé kroky při zadávání potřebných hodnot v každé fázi výpočtu. Správná funkčnost vytvořené aplikace je porovnána a ověřena s hodnotami ručního výpočtu uvedeným v literatuře pro stejné zadání řešení jeřábové dráhy. Práce je zpracována v rozsahu 94 stran a 49 stran příloh.

Klíčová slova: program, manuál, jeřábová dráha, ocelová konstrukce, zatížení jeřábové dráhy, mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti, posouzení, návrh.

Annotation

The thesis is focused on creating an algorithm for the design and assessment of a beam of a crane runway according to valid standards. The program is created in a Microsoft Excel. More complicated procedures have been programmed in Visual Basic for Applications. The core of the work is to design an application that helps to calculate the load acting on the crane runway and to design its cross-section. That program carries out an assessment verifying of ultimate limit states as well as serviceability limit states, i.e. the strength of the section, loss of stability of beam, buckling of thin walls, fatigue assessment and verification of limit deflections. There was a made a manual for correct understanding of an application. It explains the individual steps for entering the necessary values in each stage of the calculation. Proper functionality of application is verified by manual calculation with the values reported in the literature for the same task. Thesis is written in a scope of 94 pages and 49 pages of the annexes.

Key words: software, manual, cranes runway, steel structure, load of crane runway, ultimate limit state, serviceability limit state, assessment, design.

1	Úvod	4
2	Jeřábová dráha	5
2.1	Všeobecně	5
2.2	Jeřáby	5
2.3	Hlavní nosník jeřábové dráhy.....	8
2.3.1	Jeřábové dráhy z válcovaných profilů	8
2.3.2	Jeřábové dráhy se složeným nosníkem	8
2.3.3	Jeřábové dráhy s dvojstěnným nosníkem	10
2.4	Kolejnice jeřábových drah	10
2.5	Nárazníky jeřábových drah	12
3	Zatížení jeřábové dráhy	13
3.1	Zatížení stálé	15
3.1.1	Hlavní nosník jeřábové dráhy	15
3.1.2	Kolejnice jeřábové dráhy	15
3.1.3	Vodorovný výztužný nosník a revizní lávka	15
3.2	Zatížení nahodilé (proměnné)	15
3.2.1	Svislé zatížení od kol jeřábu	15
3.2.2	Vodorovné síly.....	18
3.3	Ostatní nahodilá zatížení	22
3.4	Mimořádná zatížení.....	22
3.5	Únavová zatížení	23
3.6	Součinitele zatížení.....	24
3.6.1	Dílčí součinitele zatížení	24
3.6.2	Dynamické součinitele zatížení	24
3.7	Kombinace zatížení	25
4	Vnitřní síly na nosníku JD	26
4.1	Svislé zatížení od kol jeřábu	26
4.1.1	Maximální ohybový moment M_{max}, F	26
4.1.2	Maximální posouvající síla V_{max}, F	27
4.2	Vodorovné zatížení od kol jeřábu.....	27

4.2.1	Podélné vodorovné síly	27
4.2.2	Příčné vodorovné síly	28
4.3	Vnitřní síly od stálého zatížení	29
4.4	Rekapitulace vnitřních sil.....	29
5	Hlavní nosník jeřábové dráhy:	30
5.1	Návrh průřezu hlavního nosníku JD	30
5.2	Výběr pevnostní třídy oceli	31
5.3	Klasifikace průřezu	31
5.4	Mezní stav únosnosti.....	32
5.4.1	Posouzení pásnic v krajních vláknech nosníku	32
5.4.2	Posouzení stojiny v neutrální ose průřezu při maximálním smykovém napětí	33
5.4.3	Posouzení stojiny pod kolovým zatížením při interakci napětí	34
5.4.4	Posouzení pásnic pro kombinaci se svislými i vodorovnými silami	38
5.4.5	Posouzení hlavního nosníku jeřábové dráhy na klopení	38
5.4.6	Posouzení nosníku JD na boulení	39
5.4.7	Posouzení výztuh.....	45
5.4.8	Posouzení svaru.....	49
5.5	Mezní stavy použitelnosti	52
5.5.1	Svislé průhyby nosníků	52
5.5.2	Štíhlost stojiny	55
5.5.3	Štíhlost spodní pásnice.....	55
5.6	Únava	55
5.6.1	Únavová pevnost.....	57
5.6.2	Posouzení	58
5.6.3	Posouzení pásnic pro rozkmit normálového napětí od ohybového momentu	58
5.6.4	Posouzení stojiny pro rozkmit hlavního napětí od ohybového momentu a posouvající síly	59
5.6.5	Posouzení krčních svarů pro rozkmit smykového napětí od posouvající síly	60
5.6.6	Posouzení krčních svarů pro rozkmit svislého tlakového napětí od tlaků kol	61
6	Program vytvořený v MS Excel.....	63
6.1	Základní parametry jeřábů + načtení kolejnice	63
6.1.1	Parametry jeřábů	63
6.1.2	Parametry kolejnice	65
6.2	Zatížení hlavního nosníku JD.....	66

6.2.1	Stálé zatížení	66
6.2.2	Proměnná zatížení.....	66
6.2.3	Únavové zatížení	69
6.2.4	Dílčí součinitele zatížení	70
6.3	Výpočet vnitřních sil na nosníku JD	70
6.4	Návrh a posouzení hlavního nosníku	74
6.5	Posouzení spoje stojiny a pásnice nosníku (krčních svarů)	81
6.6	Mezní stav použitelnosti – hlavní nosník JD.....	82
6.7	Únava	83
7	<i>Závěr.....</i>	87
8	<i>Použité zdroje.....</i>	89
8.1	Seznam použité literatury.....	89
8.2	Použité programy.....	90
9	<i>Seznam použitých obrázků a tabulek</i>	91
9.1	Seznam obrázků	91
9.2	Seznam tabulek.....	93
10	<i>Seznam příloh</i>	94

1 Úvod

Předmětem diplomové práce je algoritmizace výpočtu jeřábové dráhy. Požadavkem v zadání bylo vytvoření programu pro návrh a posouzení její nosné konstrukce. Tyto bývají velice složitými stavbami, namáhanými množstvím různých zatížení, jak statickými, tak dynamickými. Jejich výpočty jsou velice náročné a rozsáhlé. Při zohlednění úplně všech výpočtů by byla práce nadmíru obsáhlá. Předmětem diplomové práce bylo posouzení hlavního nosníku jeřábové dráhy. Pro výpočet zatížení, vnitřních sil na něj působících, návrh průřezu a jeho posouzení podle současných platných norem byl vytvořen program, jenž tyto postupy usnadňuje.

Podle zadání má výpočet obsahovat posouzení pevnosti průřezu, klopení nosníku, boulení štíhlých stěn podle mezních stavů únosnosti, ověření mezních stavů použitelnosti a únavy.

Posouzení nosníků jeřábových drah má řadu specifik, se kterými se u ostatních konstrukcí nesetkáváme. Jedním z úkolů této práce bylo popsat jednotlivé postupy návrhu nosníku a vytvořit program usnadňující výpočet zatížení a vnitřních sil na něj působících.

Rozhodl jsem se jej navrhnout v tabulkovém procesoru MS Excel, jenž je běžně dostupný široké veřejnosti. Ten podstatně ulehčí práci s výpočty. Program jsem vytvořil v jazyku Visual Basic for Application, jenž je s tímto tabulkovým procesorem kompatibilní.

Dalším úkolem je vytvoření stručného manuálu pro případné uživatele. Ten jim má napomoci při práci s programem, vysvětlit postup jednotlivých výpočtů, možnosti použití nosníků, návrhu druhů kolejnic a postup při vyvolání jednotlivých procedur.

Posledním požadavkem byla kontrola funkčnosti vytvořeného programu porovnáním výsledků, jež jsme s jeho pomocí dosáhli, s výsledky stejné jeřábové konstrukce, kde byly výpočty provedeny ručně.

2 Jeřábová dráha

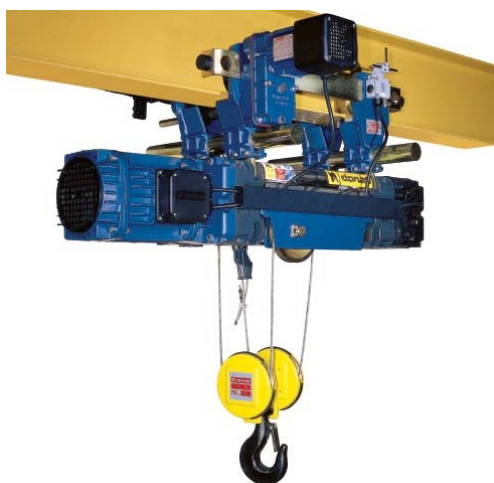
2.1 Všeobecně

Jeřábová dráha (JD) je nosná konstrukce potřebná pro umístění jeřábů, umožňuje a zajišťuje jejich bezpečný provoz. Konstrukce jeřábové dráhy je tvořena svislým hlavním nosníkem, kolejnicí, vodorovným výztužným nosníkem, brzdným ztužidlem, doplňkovými prvky - nárazníky, obslužnými lávkami se zábradlím apod.

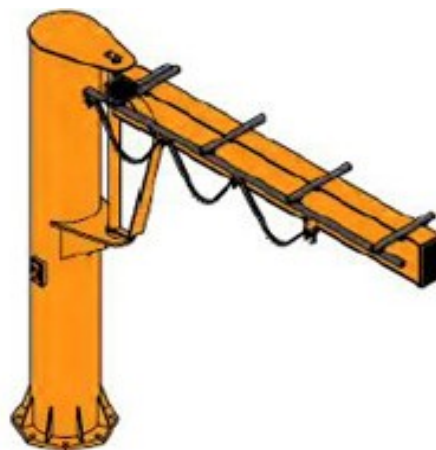
Zdvihací zařízení (tzn. zdvihadla, jeřáby a výtahy) patří mezi základní vybavení většiny průmyslových objektů - výrobních, montážních, skladovacích a technologických. Dále se jeřáby využívají například ve stavebnictví a v mnoha jiných oborech, kde vyvstává nutnost manipulace s těžkými nebo objemnými předměty. Dnes se jich využívá široká škála. V další kapitole se zaměřuji na jejich rozdělení a popis jejich základních prvků.

2.2 Jeřáby

Lze rozlišit mnoho druhů jeřábů. V halách bývají nejvíce používány podvěsné jeřáby, s ručním nebo motorovým pohonem (obr. 1), otočné jeřáby (obr. 2), mostové jeřáby (obr. 3), podvěsné mostové jeřáby, stohovací jeřáby, konzolové jeřáby (obr. 4), portálové jeřáby (obr. 5), popřípadě poloportálové jeřáby.



Obr. 1 Podvěsný jeřáb [13]



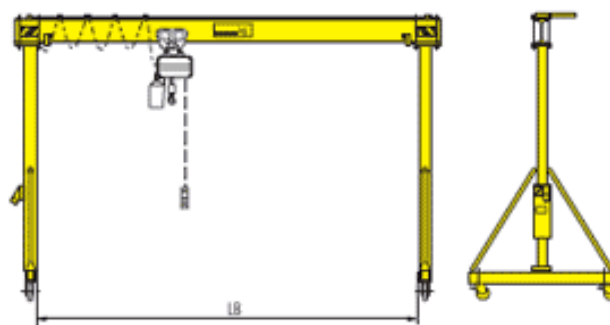
Obr. 2 Otočný jeřáb [16]



Obr. 3 Mostový jeřáb [15]



Obr. 4 Konzolový jeřáb [13]

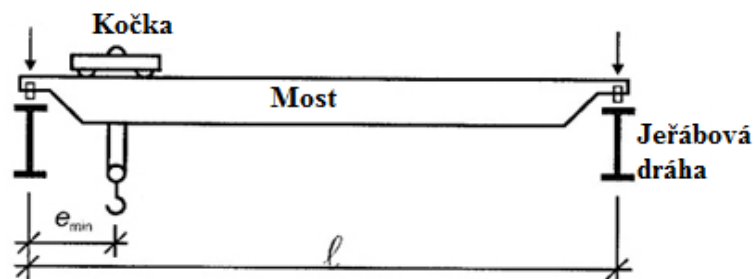


Obr. 5 Portálový jeřáb [19]

Diplomová práce je zaměřena na mostové jeřáby (Obr. 3). Mostovými jeřáby nazýváme ty druhy jeřábů, u nichž nosnou ocelovou konstrukci tvoří jeřábový most pojíždějící po vyvýšené jeřábové dráze. Jedná se o jeden z nejčastěji používaných a navrhovaných jeřábů využívaných v průmyslových, výrobních, skladovacích halách, překladištích a jiných prostorech, jak venkovních, tak vnitřních. Nejvíce používaná konstrukce mostového jeřábu je tvořena plnostěnným jeřábovým mostem, jenž se pohybuje po kolejnicích jeřábové dráhy. Dále jsou vyráběny konstrukce jeřábů z válcovaných profilů. Dříve se převážně využívalo technické řešení příhradové konstrukce pro příčník mostového jeřábu. Pojízdní jeřábu zajišťují obvykle elektromotory, kdy každá strana má svůj vlastní pohon. Tyto elektromotory musí být plně synchronní, aby zajistily rovnoměrný pohyb celého jeřábového mostu. Pojezdové ústrojí je obvykle tvořeno párem kol namontovaných na přivařený příčník. Po jeřábu (mostu) pojíždí vozík (kočka), jenž nese zdvihadí zařízení a umožňuje přesunování břemene. Mostové jeřáby mají různou nosnost cca od 1 tuny do řádově stovek tun.

Podle nosnosti rozeznáváme jeřáby:

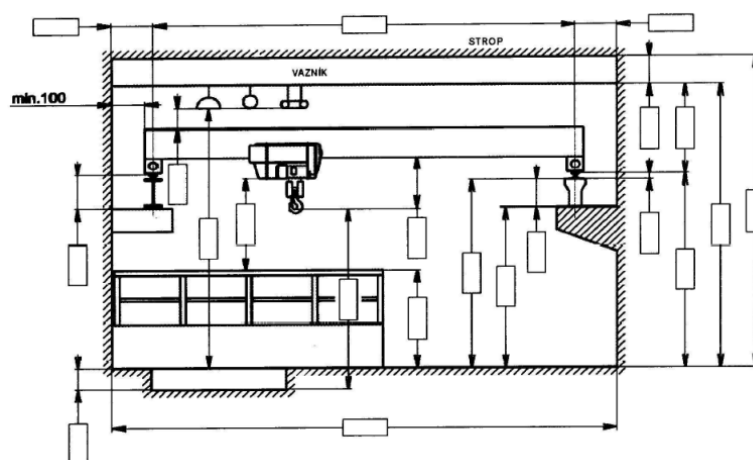
- lehké... nosnost do 12,5 t
- středně těžké... nosnost 12,5 až 50 t
- těžké... nosnost nad 50 t.



Obr. 6 Mostový jeřáb [6]

Jeřáby jsou řízeny z kabiny zavěšené na mostě jeřábů nebo ze země pomocí kabelového či dálkového ovladače.

Základní parametry jeřábů udává výrobce v jeho technické dokumentaci. Zde je taky uveden návrh příčného řezu, ve kterém se řeší průjezdný profil. Vnitřní jeřábové dráhy konstruktéři navrhnu a umístí dle prostorových možností objektu a požadavku investora tak, aby respektovaly normativně předepsanou minimální vzdálenost zařízení od ostatních konstrukcí. Dle ČSN 27 0140 [1] je minimální vzdálenost stanovena na 100 mm. Musí se zvážit návaznosti na stávající konstrukce, případné spolupůsobení, kolize se stávajícím založením objektu apod. K požadavkům investora pak obvykle patří požadovaná minimální výška zdvihu, požadavky na dojezdy háků, event. potřeba průjezdu jeřábu nad různými vestavbami a technologickými zařízeními. Schéma řešení příčného řezu, ze kterého vyplývají také výchozí požadavky pro návrh nosníků jeřábové dráhy, je znázorněn na obrázku č. 7.



Obr. 7 Průjezdný profil

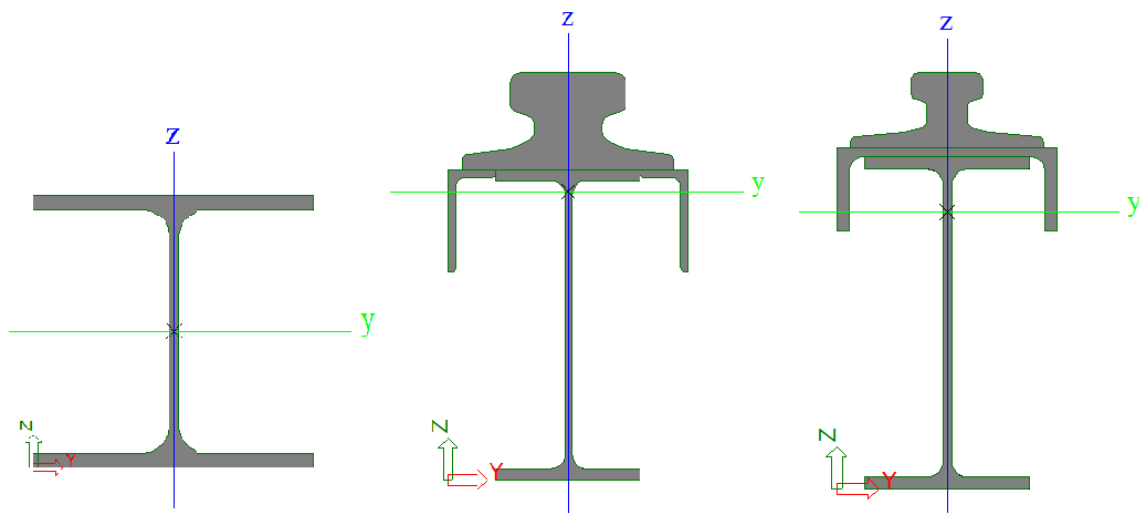
Stěžejním prvkem návrhu jeřábové dráhy je jeho samotný pojížděný hlavní nosník. Jeho návrh má řadu specifik, se kterými se u jiných typů ocelových konstrukcí nesetkáme.

2.3 Hlavní nosník jeřábové dráhy

Tímto nosníkem se zejména rozumí profil pojížděný jeřábem. Pojezdová kola jeřábu se pohybují po kolejnici, jež je uchycena k hlavnímu nosníku. Prostý nosník jeřábové dráhy je obvykle jedním montážním dílcem, jenž se jako celek osazuje na sloupy. Průřezy nosníku se navrhují v závislosti na rozponu a nosnosti projektovaných jeřábů. Konstrukční řešení jeřábových drah.

2.3.1 Jeřábové dráhy z válcovaných profilů

Toto použití je typické pro lehké jeřáby při malém rozpětí dráhy (cca do 6 m). Nosník z válcovaných profilů může mít zesílenou horní pásnici (obr. 8), kvůli přenosu příčných vodorovných sil. Nejčastěji používané válcované profily jsou I, IPE, HEA a HEB. Zesílení pásnice je provedeno buď pomocí navařené dvojice úhelníků nebo pomocí profilu U, UPE, jež bývají navařeny na horní pásnici válcovaného nosníku.

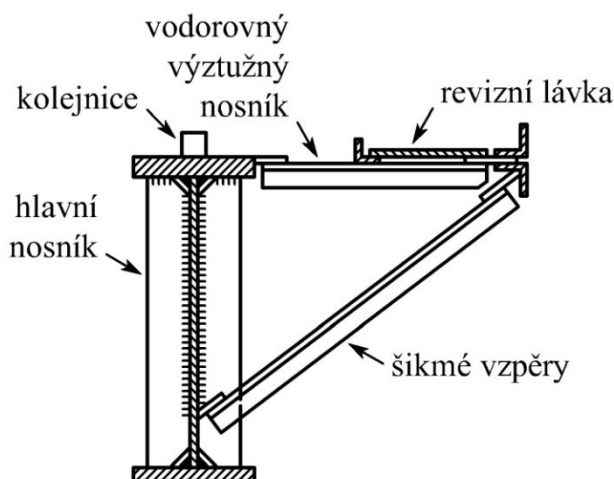


Obr. 8 Jeřábové dráhy z válcovaných profilů

2.3.2 Jeřábové dráhy se složeným nosníkem

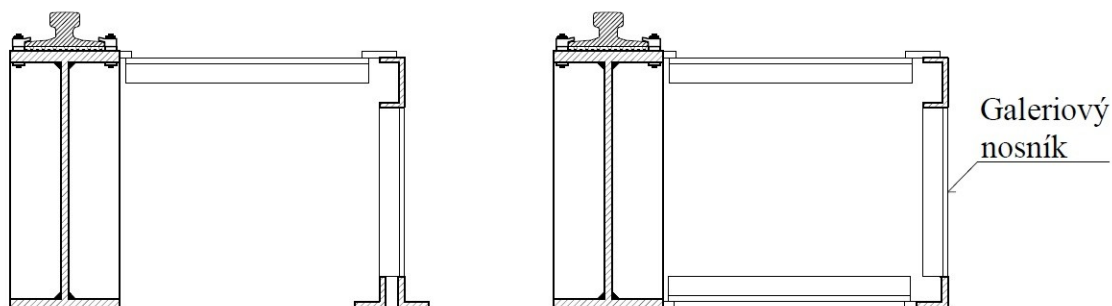
Toto řešení se používá pro středně těžké jeřáby a pro větší rozpětí. Obvykle bývají navrhovány svařované nesymetrické průřezy I, jež jsou ve vodorovném směru vyztužené příhradovým nebo plnostěnným vodorovným nosníkem. Horní pásnice bývá mohutnější (je součástí vodorovného nosníku). Vodorovný nosník slouží jednak k přenosu příčných

vodorovných sil, ale také jako podpora pro lávku. Příhradový vodorovný nosník se skládá z diagonál, svislic a z volného pásu. Obvykle konstruktéři diagonály navrhují z jednoho úhelníku a volný pás z průřezu U nebo z jednoho či dvou úhelníků (obr. 9). Plnostěnný vodorovný nosník bývá tvořen plechem, vyztuženým zespodu páskovou ocelí nebo úhelníky a okrajovým nosníkem z profilu U nebo dvojice úhelníků. Často se používá žebrovaný plech nebo plech s oválnými výstupky, jenž bývá přivařen koutovými sváry na horní pásnici hlavního nosníku a na okrajový nosník. Při rozpětí jeřábových drah větším než 6 m se navařují na volný pás vodorovného nosníku šikmé vzpěry. Ty vytváří podpěru pro okrajový nosník. Volný pás se opírá šikmými vzpěrami ve třetinách nebo čtvrtinách délky o dolní pásnici hlavního svislého nosníku. Je-li hlavní nosník jeřábové dráhy vyztužen, je vhodné připojit šikmé vzpěry na tyto výztuhy (obr. 9).



Obr. 9 Složený nosník jeřábové dráhy [18]

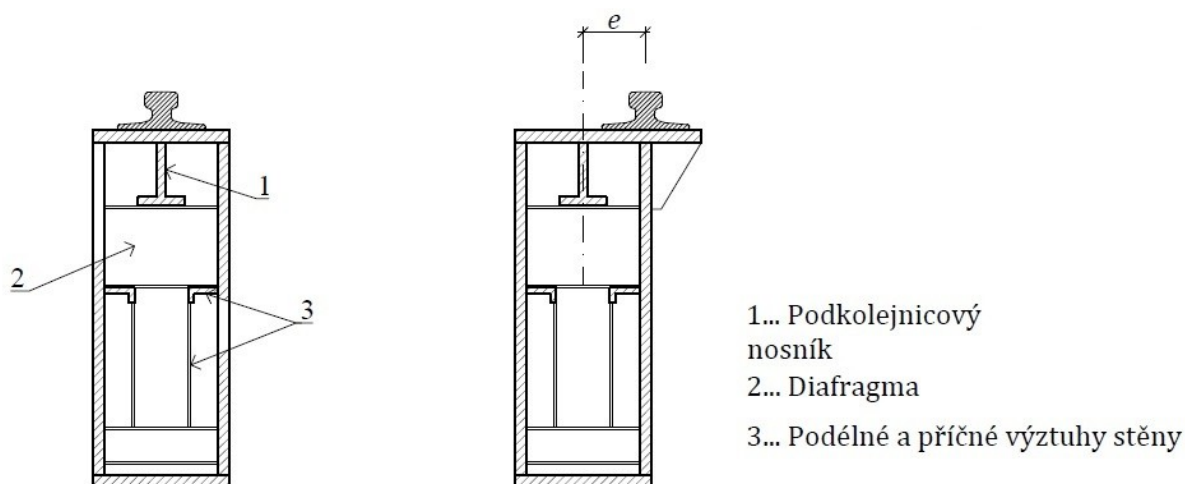
Při větším rozpětí jeřábové dráhy se volný pás podepírá galeriovým nosníkem (obr. 10). Šikmé vzpěry bývají nahrazeny příhradovou soustavou, jež vytváří tuhý prostorový nosník, zabráňující kroucení.



Obr. 10 Galeriový nosník

2.3.3 Jeřábové dráhy s dvojstěnným nosníkem

Používají se pro zvláště těžké jeřáby. Uzavřený průřez je odolný vůči účinkům kroucení, a proto při dostatečné šířce průřezu není nutné navrhovat vodorovný nosník. Kolejnice bývají uchycené uprostřed horní pásnice nosníku, jež musí být podepřena podkolejnicovým nosníkem, uloženým na příčných diafragmatech průřezu. Dalším řešením může být uložení kolejnice nad stěnu nosníku. Zde musíme počítat s excentricitou zatížení a vznikem přidavných krouticích momentů (obr. 11).



Obr. 11 Uzavřený průřez jeřábové dráhy

Součástí návrhu jeřábové dráhy je i volba vhodného příslušenství. Práce projektanta tedy spočívá i v návrhu kolejnice, připojovacích prvků kolejnice, nárazníků a ložisek. Přes ložiska jsou nosníky uloženy na další nosnou konstrukci jeřábové dráhy, jež je navržena dle dispozic navrhované stavby. Jde zejména o sloupky nebo konzoly, brzdné ztužení a založení.

2.4 Kolejnice jeřábových drah

Jeřábová kolejnice je nejexponovanější součástí jeřábové dráhy, neboť je bezprostředně namáhána tlaky kol, brzdnými a příčnými vodorovnými silami, a proto je pro jejich výrobu používána speciální ocel s vysokou pevností.

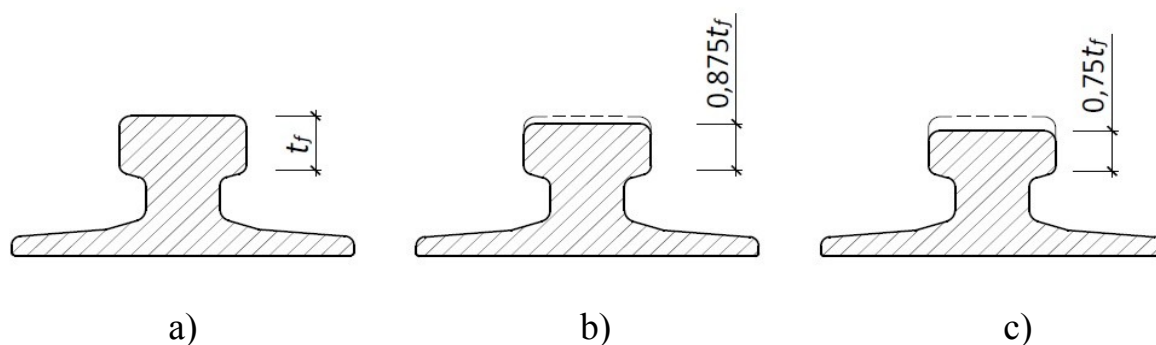
Pro kolejnice, jejich připojení a stykování je v ČSN EN 1993-6 (v čl. 3.6, 8.4, 8.5 a 8.6) uvedeno několik obecných pokynů. Problematika jeřábových kolejnic je také obsažena v mezinárodní normě ISO 16881-1 [12].

Používají se kolejnice čtvercového nebo obdélníkového průřezu a kolejnice profilové (tvarované). Součástí této diplomové práce bylo vytvoření knihovny nejpoužívanějších typů jeřábových kolejnic (viz tabulka 1). Jejich rozměry byly odečteny z českých (ČSN EN 42 5678 a VN 42 5677) a evropských norem (DIN 536-1 a DIN 536-2).

Tabulka 1 Knihovna jeřábových kolejnic kolejnice

Profil	Rozměry				Údaje		Statické veličiny			Rozměry dle normy
	t_r	h_r	$b_{r(pata)}$	$b_{r(hlava)}$	A	m	$I_{r,100}$	$I_{r,87,5}$	$I_{r,75}$	
	[mm]				[mm ²]	[kg/m]	[mm ⁴]			
A45	20,0	55,0	125	45	2823	22,1	1,684E+06	1,665E+06	1,646E+06	DIN 536-1
A55	25,0	65,0	150	55	4056	31,8	3,358E+06	3,315E+06	3,272E+06	
A65	30,0	75,0	175	65	5514	43,1	6,076E+06	5,990E+06	5,904E+06	
A75	35,0	85,0	200	75	7177	56,2	1,010E+07	9,948E+06	9,795E+06	
A100	40,0	95,0	200	100	9506	74,3	1,342E+07	1,301E+07	1,259E+07	
A120	47,5	105,0	220	120	12793	100,0	2,345E+07	2,259E+07	2,174E+07	
A150	50	150,0	220	150	19311	150,2	3,652E+07	3,476E+07	3,300E+07	
F100	41	80,0	100	100	7355	57,5	5,466E+06	5,039E+06	4,612E+06	DIN 536-2
F120	41	80,0	120	120	8955	70,0	9,701E+06	8,963E+06	8,225E+06	
JKL55	20	85,0	100	55	3769	29,6	1,323E+06	1,288E+06	1,254E+06	VN 425677
JK65	30	75,0	175	65	5540	43,5	6,092E+06	6,006E+06	5,920E+06	ČSN 425678
JK85	85	100,0	200	85	10252	80,4	1,335E+07	1,276E+07	1,217E+07	
Prostý průřez	100	100,0	100	100	10000	78,5	8,333E+06	5,583E+06	3,516E+06	

Profilové kolejnice (řady A, F, JK a JKL) byly namodelovány v programu AutoCad 2014, ve kterém byly získány potřebné hodnoty průřezových charakteristik plných a opotřebovaných kolejnic (viz obr. 12).



Obr. 12 Schéma profilované kolejnice

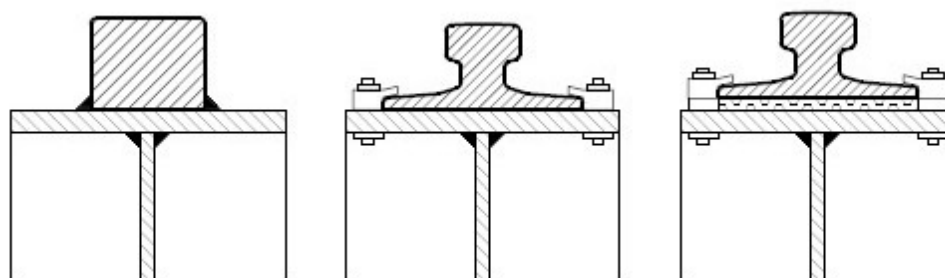
Schéma kolejnice b) je určeno pro výpočet momentu setrvačnosti kolejnice potřebné při posouzení rozkmitu krčních svarů od svislých tlaků kol (opotřebení 12,5%). Schéma kolejnice c) je určeno pro výpočet momentu setrvačnosti kolejnice potřebné při posouzení stojiny pod kolovým zatížením (opotřebení 25%).

Kolejnice může být připojena k horní pásnici průřezu dvěma způsoby – dvěma konstrukčními systémy – posuvným a neposuvným (obr. 13).

Neposuvný konstrukční systém je realizován tak, že je kolejnice připojena k horní pásnici průřezu napevno, pomocí svarů nebo lícovaných, či předpjatých šroubů. Dnes se tento způsob používá zejména pro připojení kolejnic navržených ze čtvercových nebo

obdélníkových tyčí, připojených přerušovaným koutovým svarem. Výhodou tohoto konstrukčního systému je možnost započíst redukovaný (z důvodu opotřebení) průřez kolejnice do celkového průřezu nosníku JD. Kolejnice však u tohoto konstrukčního systému nelze vyměnit, proto musí být navržena na požadovanou životnost jeřábové dráhy. Doporučuje se pro nižší nosnosti jeřábu a nižší vytížení.

Posuvný konstrukční systém je proveden tak, že kolejnice je připojena speciálními připojovacími prostředky, jako jsou příchytky a pružné roznášecí podložky, k horní pásnici průřezu. Kolejnice lze pak jednoduše vyměnit. Doporučuje se u vysokých nosností jeřábu a vysokého vytížení.



Případ a)

Případ b)

Případ c)

Obr. 13 Způsoby připojení kolejnice k horní pásnici

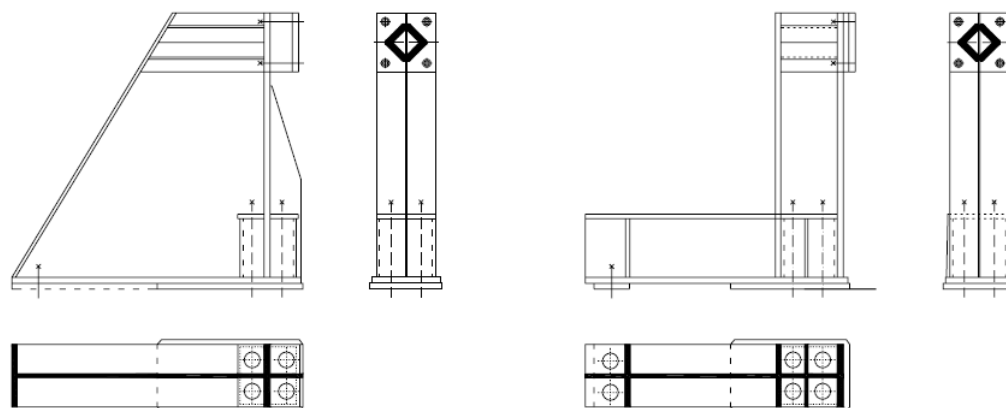
Na obr. 13 jsou znázorněny tyto případy uložení kolejnice. Případ uložení a) je určen pro jeřábovou kolejnici neposuvně připojenou k pásnici. Případ uložení b) je určen pro jeřábovou kolejnici neposuvně nepřipojenou k pásnici. Případ uložení c) je určen pro jeřábovou kolejnici uloženou na vhodné elastomerové podložce (viz odst. 5.7.1(2) ČSN EN 1993-6).

2.5 Nárazníky jeřábových drah

Nárazníky jsou konstrukčními prvky, jež zabraňují vyjetí jeřábu z jeřábové dráhy (obr. 14). Připojují se k hlavnímu nosníku nejčastěji pomocí šroubových spojů, aby bylo možno poškozený kus jednoduše vyměnit. Nárazníky jsou pro běžné typy jeřábů s nosností 5 až 50 tun normalizovány a navrženy podle následujících zásad:

- nárazník musí pružným působením přenést sílu, kterou vyvine příslušný jeřáb jedoucí rychlostí rovnou $\frac{3}{4}$ jmenovité rychlosti pojezdu jeřábu;
- při větší rychlosti nárazu by mělo dojít k poškození nárazníku, nikoliv však sjetí jeřábu z jeřábové dráhy nebo poškození jeřábového mostu;
- připojující šrouby jsou namáhány pouze tahem, smyk je přenášen deskami doléhajícími na sebe čely.

Řadu typizovaných nárazníku je možno vyhledat v normě ČSN 27 0005 [1].



Obr. 14 Typizovaný nárazník jeřábových drah z normy ČSN 27 0005 [1].

3 Zatížení jeřábové dráhy

Zatížení JD lze rozdělit na stálá, proměnná, mimořádná a na únavová. Do skupiny stálého zatížení řadíme ty zatěžovací stavy, jež nejsou proměnné v čase z hlediska svojí velikosti, polohy, smyslu nebo směru. Naopak všechny zatěžovací stavy, jež působí opakovaně a dynamicky, řadíme do skupiny nahodilých (proměnných) zatížení. Jedná se hlavně o zatížení jeřáby a vším ostatním spjatým s jejich provozem. Dynamické účinky zatížení se řeší přibližně zavedením dynamických součinitelů $\varphi_1 - \varphi_7$. Tyto součinitele závisí na základních parametrech jeřábu (jeho typu, rychlosti zdvihu, typu pohonu atd.). Mezi mimořádné zatížení patří síly, které vznikají nárazem na nárazníky. Pro tyto konstrukce je nutné zahrnout do výpočtu i únavové zatížení.

Zatížení jeřábové dráhy analyzujeme v souladu s dokumenty ČSN EN 1990, ČSN EN 1991-1-1 a ČSN EN 1991-3.

Přehled zatížení:

Stálé:

- Vlastní tíha konstrukce jeřábové dráhy:
 - hlavního nosníku jeřábové dráhy
 - kolejnice
 - vodorovného výztužného nosníku, lávky, zábradlí.

Nahodilé:

- Svislá zatížení – svislé tlaky kol od hmotnosti:
 - jeřábu
 - kočky
 - břemene.
- Vodorovná zatížení – vodorovné síly způsobené:
 - zrychlením nebo zpomalením jeřábu
 - zrychlením nebo zpomalením kočky
 - přičlením jeřábu
- Ostatní – proměnné zatížení:
 - lávek
 - plošin
 - schodišť
 - zábradlí.
 - Ve výjimečných případech se uvažuje i se zatížením větrem nebo zkušebním zatížením.

Mimořádné:

- Síly na nárazník související s pohybem:
 - jeřábu
 - kočky.

Únava:

- Únavové zatížení jeřáby.

Program, který byl v rámci této práce vytvořen (kapitola 6), počítá se stálým, nahodilým zatížením od jeřábu a únavovým zatížením.

3.1 Zatížení stálé

Jeřábovou dráhu navrhujeme jako soustavu vzájemně nezávislých prostých nosníků. Vlastní tíhu jeřábového mostu tudíž nelze považovat za stálé zatížení, neboť při přejezdu jeřábu mimo posuzované pole nejsou jeřábem žádné účinky vyvozovány. Mezi stálé zatížení patří vlastní tíha jeřábové kolejnice, hlavního nosníku, vodorovného výztužného nosníku a lávky včetně zábradlí.

3.1.1 Hlavní nosník jeřábové dráhy

Nejčastěji se navrhuje staticky určitá konstrukce (tedy prostý nosník). Průřezy nosníku se navrhují v závislosti na rozponu a nosnosti projektovaných jeřábů (viz kapitola 2.3).

3.1.2 Kolejnice jeřábové dráhy

Volba typu a rozměru kolejnice závisí na konkrétním druhu jeřábu, doporučené typy udává v podkladech výrobce (dodavatel) jeřábů.

3.1.3 Vodorovný výztužný nosník a revizní lávka

Součástí jeřábové dráhy bývá často obslužná revizní lávka. Konstrukčně je výhodné provedení vodorovného nosníku jako příhradového nosníku s vertikálami, které budou podpírat konstrukci pro lávku. Vlastní tíhu vodorovného nosníku, lávky a zábradlí v této fázi výpočtu musíme odhadnout.

3.2 Zatížení nahodilé (proměnné)

Do skupiny nahodilých zatížení řadíme ty zatěžovací stavy, jež mění v čase svou velikost, polohu, smysl nebo směr. Zatížení uvažujeme v souladu s ustanoveními, uvedenými v [6]. Charakteristické hodnoty složek svislých a vodorovných zatížení se mají určit z technických údajů jeřábu uvedených jeho dodavatelem.

3.2.1 Svislé zatížení od kol jeřábu

Pro běžné provozní podmínky se má svislé zatížení sestavit z vlastní tíhy jeřábu, tíhy kladkostroje (kočky), tíhy břemene (tedy nosnosti jeřábu) a příslušných dynamických součinitelů $\varphi_1 - \varphi_4$. Výpočtové postupy v ČSN EN 1991-3 vyžadují rozložit svislý tlak pojezdového kola Q na složku Q_C , vyvozenou tíhou samotného jeřábu (včetně kočky), a složkou Q_H , vyvozenou tíhou břemene (neboli zatížením kladkostroje). V mezních stavech únosnosti se totiž každá ze složek Q_C , Q_H násobí jiným dynamickým součinitelem φ_i a obecně vzato i jiným součinitelem zatížení $\gamma_{G,sup}$ a $\gamma_{G,sup}$. Z technický listů jeřábu lze někdy vyčíst

hodnoty dynamických součinitelů $\varphi_1 - \varphi_4$, resp. součinitelů zatížení $\gamma_{G,sup}, \gamma_{G,sup}$. Nejsou-li tyto hodnoty dodavatelem udávány, vyčteme je z tabulek 2.4 a 2.6 v normě ČSN EN 1991-3.

3.2.1.1 Tíha jeřábu

Zahrnuje tíhy všech pevných a pohyblivých částí včetně strojního a elektrického zařízení konstrukce jeřábu (viz čl. 1.4.1.2 a odst. 2.5.2.1(1) ČSN EN 1991-3). Jedná se o zařízení, jež jsou trvale nainstalována. Podle krajní polohy kočky rozdělíme tyto síly do větví jeřábové dráhy. Získáme tedy maximální a doprovodnou hodnotu svislých tlaků kol (obr. 15 a obr. 16).

Svislé síly od kol nezatíženého jeřábu způsobené jeho vlastní tíhou lze vypočítat ze vztahu

$$Q_{C,r,max} = \frac{1}{n} \frac{Q_C - Q_t}{2} + \frac{Q_t \cdot (s - c)}{s}, \quad (1)$$

$$Q_{C,r,(max)} = \frac{1}{n} \frac{Q_C - Q_t}{2} + \frac{Q_t \cdot c}{s}, \quad (2)$$

kde	$Q_{C,r,max}$	je	maximální zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu,
	$Q_{C,r,(max)}$		doprovodné zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu,
	Q_C		tíha jeřábu s kočkou,
	Q_t		tíha kočky,
	s		rozpětí jeřábu,
	c		vodorovný dojezd háku,
	n		počet dvojic kol.

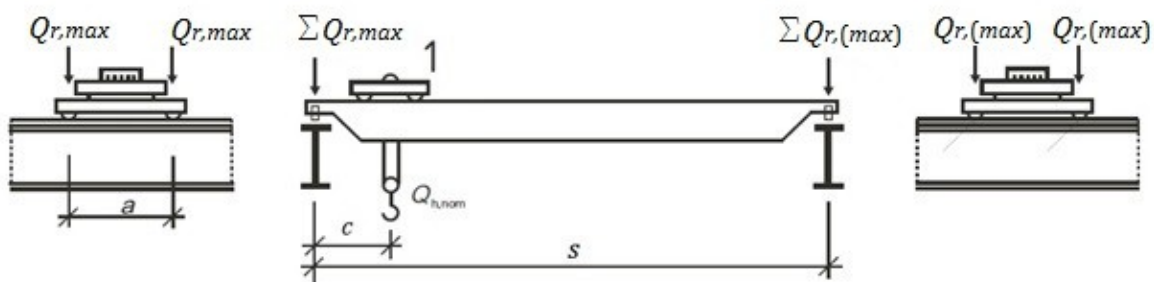
3.2.1.2 Zatížení kladkostroje

Zahrnuje tíhy užitečného zatížení (neboli břemene), prostředků pro jeho uchopení (háky, magnety) a části zavěšených zvedacích lan a řetězů (viz čl. 1.4.1.3 a odst. 2.5.2.1(1) ČSN EN 1991-3). Svislé síly od kol zatíženého jeřábu způsobené zatížením kladkostroje lze vypočítat ze vztahu

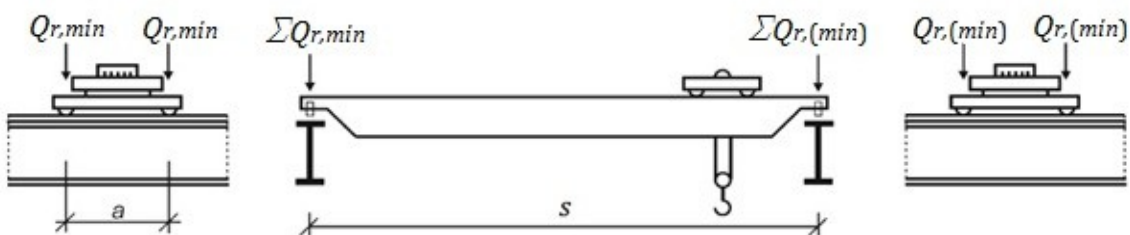
$$Q_{H,r,max} = \frac{1}{n} \frac{Q_H \cdot (s - c)}{s}, \quad (3)$$

$$Q_{H,r,(max)} = \frac{1}{n} \frac{Q_H \cdot c}{s}, \quad (4)$$

kde	$Q_{H,r,max}$	je	maximální zatížení od kladkostroje jedním kolem,
	$Q_{H,r,(max)}$		doprovodné zatížení od kladkostroje jedním kolem,
	Q_H		maximální tíha břemene.



Obr. 15 Uspořádání zatíženého jeřábu při maximálním zatížení JD [6]



Obr. 16 Uspořádání nezatíženého jeřábu při minimálním zatížení nosníku JD [6]

Význam značek:

- | | | |
|----------------------|----|--|
| $Q_{r,max}$ | je | maximální zatížení jedním kolem zatíženého jeřábu, |
| $Q_{r,(max)}$ | | doprovodné zatížení jedním kolem zatíženého jeřábu, |
| $\Sigma Q_{r,max}$ | | součet maximálních zatížení $Q_{r,max}$ na jednu větev JD od zatíženého jeřábu, |
| $\Sigma Q_{r,(max)}$ | | součet doprovodných zatížení $Q_{r,(max)}$ na jednu větev JD od zatíženého jeřábu, |
| $Q_{r,min}$ | | minimální zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu, |
| $Q_{r,(max)}$ | | doprovodné zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu, |
| $\Sigma Q_{r,min}$ | | součet minimálních zatížení $Q_{r,min}$ na jednu větev JD od nezatíženého jeřábu, |
| $\Sigma Q_{r,(max)}$ | | součet doprovodných zatížení $Q_{r,(min)}$ na jednu větev JD od nezatíženého jeřábu, |
| $Q_{h,nom}$ | | hodnota zatížení kladkostroje. |

3.2.2 Vodorovné síly

3.2.2.1 Síly $H_{L,1-2}$, $H_{T,1-2}$ způsobené zrychlením nebo zpomalením jeřábu při jeho pohybu po nosníku jeřábové dráhy

Při rozjíždění nebo brzdění jeřábu působí na nosník JD síly v podélném i v příčném směru (viz obr. 17). Dynamický účinek zatížení se zohledňuje vynásobením charakteristických hodnot složek sil $H_{L,1-2}$, $H_{T,1-2}$ dynamickým součinitelem φ_5 .

Podélné síly $H_{L,1-2}$ se vypočtou jako podíl hnací síly jeřábu K a počtu větví jeřábové dráhy n_r . Hnací síla, není-li uvedena ve specifikacích dodavatele jeřábu, se má vypočíst dle předpokladu, že je zabráněno protáčení hnacích kol dle vztahů (viz čl. 2.7.3 normy ČSN EN 1991-3).

Hnací síla

$$K = \mu \cdot m_w \cdot Q_{C,r,min}, \quad (5)$$

kde μ je součinitel tření (ocel – ocel $\mu = 0,2$; ocel – pryž $\mu = 0,5$),
 m_w počet pohonů jednotlivých kol,
 $Q_{C,r,min}$ minimální svislé zatížení od kol nezatíženého jeřábu.

Výpočet podélné síly $H_{L,i}$

$$H_{L,i} = H_{L,1} = H_{L,2} = \frac{K}{n_r} \quad (6)$$

kde K je hnací síla,
 n_r počet větví jeřábové dráhy,
Index i značí větev jeřábové dráhy.

Příčné síly $H_{T,i}$

Příčné síly $H_{T,1-2}$ závisí na poloze kočky s břemenem a na jeřábovém mostu, jež ovlivňuje výpočet polohy těžiště jeřábu. Při krajní poloze kočky s břemenem, kdy těžiště jeřábu je vychýleno o délku l_s vůči středu rozpětí jeřábového mostu, působí hnací síla K na excentricitě l_s a vyvozuje tak vodorovný moment M , kterému jsou příčné síly $H_{T,1-2}$ statickým ekvivalentem.

Moment hnací síly k těžišti jeřábu lze vypočítat ze vztahu

$$M = K \cdot l_s, \quad (7)$$

$$l_s = \xi_1 - 0,5 \cdot s, \quad (8)$$

$$\xi_1 = \frac{\Sigma Q_{r,max}}{\Sigma Q_r}, \quad (9)$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1, \quad (10)$$

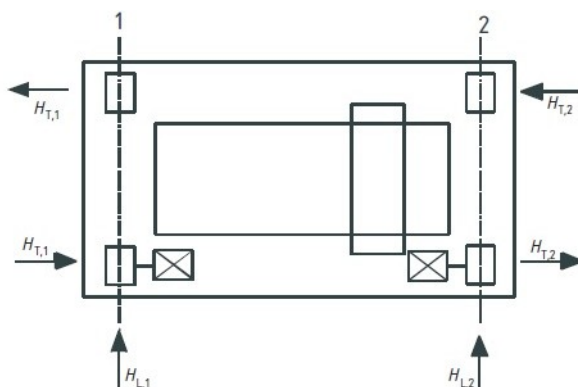
kde K je hnací síla,
 l_s vychýlení těžiště zatíženého jeřábu od poloviny jeho rozpětí,
 $\xi_{1,2}$ podíl vzdálenosti těžiště jeřábu od osy jeřábové kolejnice a rozpětí jeřábu,
 $\Sigma Q_{r,max}$ součet max. svislých zatížení od kol zatíženého jeřábu na jedné větvi JD,
 ΣQ_r součet svislých zatížení od kol zatíženého jeřábu na obou větvích JD.

Výpočet příčné síly $H_{T,i}$:

$$H_{T,1} = \xi_1 \cdot \frac{M}{b} \quad (11)$$

$$H_{T,2} = \xi_2 \cdot \frac{M}{b} \quad (12)$$

kde M je statický moment hnací síly vzhledem k těžišti jeřábu,
 b rozvor kol.



*Obr. 17 Uspořádání podélných a příčných vodorovných sil od rozjezdu
nebo brzdění jeřábu [6]*

3.2.2.2 Síly $H_{T3,i}$ způsobené zrychlením nebo zpomalením kočky při jejím pohybu po mostu jeřábu

Jedná se o setrvačné síly, které vznikají při rozjezdu nebo brzdění jeřábové kočky s břemenem. Uspořádání vodorovných sil $H_{T3,i}$ je naznačeno na obr. 18. Jejich výslednice se rovná 10% zatížení kladkostroje (tíha kočky a tíha břemene). Má-li jeřáb oboustranné nákolky, rozdělení výslednice příčných brzdících sil mezi větve jeřábové dráhy se provádí v závislosti na poměru jejich tuhostí v příčném směru. Dynamický součinitel není

při tomto typu zatížení používán. Uvažujeme-li, že jsou obě větve stejného uspořádání, lze příčné brzdné síly vypočítat ze vztahu.

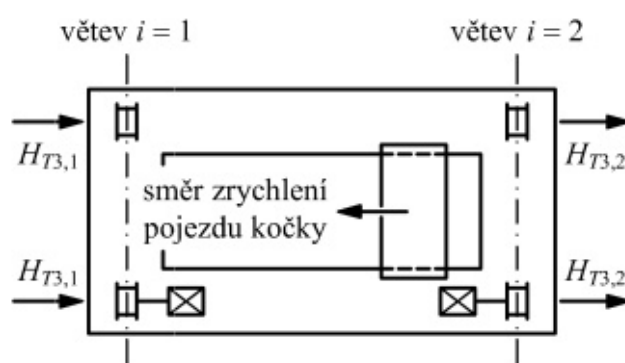
Výpočet příčné brzdné síly H_{T3}

$$H_{T3} = \frac{0,1}{2n} \cdot Q_h + Q_t, \quad (13)$$

kde Q_h je zatížení kladkostroje,

Q_t tíha kočky,

n počet dvojic kol.



Obr. 18-Uspořádání příčných brzdných sil [6]

3.2.2.3 Síly $H_{S,ij,k}$ a síla na vedení S od příčení mostového jeřábu

Při pojezdu jeřábu ustálenou rychlostí se mohou vyskytnout ve vodících prostředcích příčné i podélné síly od kol $H_{S,ij,k}$ a vodící síla S , způsobené příčením jeřábu. Tato zatížení jsou způsobena reakcemi vodících prostředků, které vyvolává kolo odchylojící se při pojezdu ze svého přirozeného podélného směru (viz odst. 2.5.2.2(5) a čl. 2.7.4 ČSN EN 1991-3).

Výsledné síly nejsou násobeny dynamickými součiniteli. Na obr. 19 je uveden příklad uspořádání sil od příčení při vedení jeřábu pomocí nákolků.

Úhel příčení α , součinitel reakcí při příčení f

Úhel příčení α lze zvolit podle mezery mezi vodícími prostředky a kolejnicí, a také podle přiměřené odchylky rozměru a opotřebení kol a kolejnic. Lze ho stanovit takto

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 \leq 0,015 \text{ rad}, \quad (14)$$

Jednotlivé složky úhlu α lze vyčíst z tabulky 2.7 v normě [6]. Nemáme-li k dispozici přesné údaje, uvažujeme konzervativně $\alpha = 0,015$ rad. Součinitel reakcí při příčení lze následně určit ze vztahu

$$f = 0,3(1 - e^{-250\alpha}) \leq 0,3. \quad (15)$$

Vzdálenost h a součinitele sil λ

Vzdálenost h mezi okamžitým středem otáčení a příslušnými vodícími prostředky, kterými jsou přední vodící prostředky ve směru pohybu, se určí podle tabulky 2.8 v normě [6]. Součinitel síly (od vodícího prostředku) λ závisí na kombinaci dvojic kol a na vzdálenosti h .

Součinitel určíme podle vztahu

$$\lambda_{s,j} = 1 - \frac{\sum e_j}{n \cdot h}, \quad (16)$$

kde n je počet dvojic kol,
 h vzdálenost mezi okamžitým středem otáčení a příslušnými vodícími prostředky,
 e_j vzdálenost od středu otáčení.

Sílu od vodícího prostředku způsobená přičlením jeřábu lze určit ze vztahu

$$S = f \cdot \lambda_s \cdot \sum Q_R, \quad (17)$$

$$\sum Q_R = \sum Q_{r,max} + \sum Q_{r,(max)}, \quad (18)$$

kde f je součinitel reakcí při přičlenění,
 λ_s součinitel síly (od vodícího prostředku),
 $\sum Q_R$ součet svislých zatížení od kol zatíženého jeřábu na obou větvích jeřábové dráhy.

Výpočet vodorovných sil $H_{S,i,j,k}$

$$H_{S,1,j,L} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \cdot \sum Q_R, \quad (19)$$

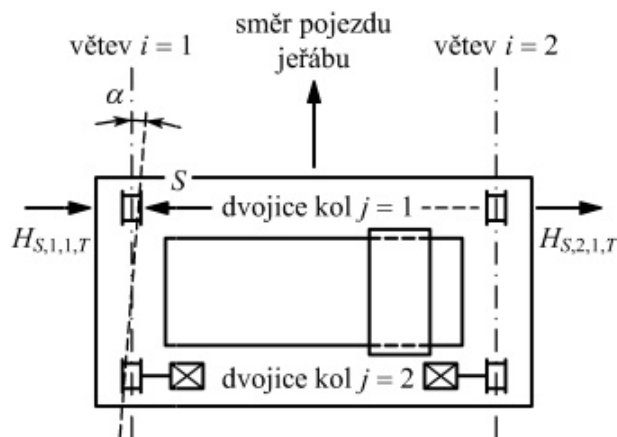
$$H_{S,2,j,L} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \cdot \sum Q_R, \quad (20)$$

$$H_{S,1,j,T} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \cdot \sum Q_R, \quad (21)$$

$$H_{S,2,j,T} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \cdot \sum Q_R, \quad (22)$$

kde $\lambda_{S,i,j,k}$ je součinitel síly,
 i kolejnice i ,
 j dvojice kol j ,
 k směr síly (L = podélná, T = příčná).

Součinitele síly $\lambda_{S,i,j,k}$ určujeme pomocí tabulky 2.9 v normě [6]. Výpočet těchto součinitelů závisí na uložení kol vzhledem k bočním posunům.



Obr. 19 Síly od přičení jeřábů [6]

3.3 Ostatní nahodilá zatížení

V prezentovaném programu se s působením těchto sil neuvažuje. V normě [6] se ještě můžeme setkat s následujícími nahodilými zatíženími:

Svislá zatížení lávek

Přístupové lávky, plošiny a schodiště se mají zatížit svislým zatížením Q_k rozloženým na čtvercové ploše $0,3 \times 0,3$ m. Hodnota svislého zatížení se uvažuje:

- $Q_k = 3,0$ kN pro lávky, kde může být uložený materiál,
- $Q_k = 1,5$ kN pro lávky, které jsou určeny pouze pro přístup,
- $Q_k = 0,0$ kN jestliže na uvažovaný konstrukční prvek působí zatížení jeřábem.

Vodorovná zatížení zábradlí

Pokud nebude uvedeno jinak, má být zábradlí zatíženo vodorovným soustředným zatížením $H_k = 0,3$ kN. Vodorovné zatížení H_k lze zanedbat, jestliže na všechny konstrukční prvky působí zatížení od jeřábu.

Zkušební zatížení

Na působení tohoto zatížení se má nosník jeřábové dráhy posoudit jen v tom případě, jestliže po montáži jeřábové dráhy na nosnou konstrukci budou prováděny zkušební zkoušky.

3.4 Mimořádná zatížení

Mezi mimořádné zatížení patří síly, které vznikají při nárazu jeřábu na nárazníky. Tyto síly jsou řazeny do dvou kategorií:

- Síly na nárazníky $H_{B,1}$ související s pohybem jeřábu,
- Síly na nárazníky $H_{B,2}$ související s pohybem kočky.

Dále mezi mimořádné zatížení řadíme tzv. klopné síly, ty můžou vznikat při kolizi zatížení nebo prostředků pro uchopení břemene s nějakou překážkou.

3.5 Únavová zatížení

K posouzení detailů jeřábové dráhy na únavu lze použít ekvivalentní návrhové spektrum zatížení jedním kolem jeřábu Q_e o konstantním rozkmitu a referenčním počtu zatěžovacích cyklů $N_c = 2 \cdot 10^6$, které způsobuje stejné únavové poškození jako skutečné spektrum zatížení (viz odst. A. 5(2) ČSN EN 1993-1-9). Ekvivalentní návrhové spektrum zatížení Q_e se vypočítá ze vztahu dle rovnice ((2.16) z normy ČSN EN 1991-3)

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda \cdot Q_{r,max} \quad (23)$$

kde φ_{fat} je dynamický součinitel pro ekvivalentní poškození rázem,
 λ součinitel ekvivalentního poškození,
 $Q_{r,max}$ maximální zatížení jedním kolem zatíženého jeřábu.

Dynamický součinitel φ_{fat} pro obvykle podmínky lze určit ze vztahu

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2}, \quad (24)$$

$$\varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2}, \quad (25)$$

kde φ_1, φ_2 jsou dynamické součinitele vyjadřující vliv dynamických účinků jeřábu při zdvihání břemene (viz kap. 3.6.2).

Svislé zatížení od tlaku kola je opět nutné rozložit do dvou složek, od tíhy samotného jeřábu a od tíhy břemene, pro něž se použijí dva odlišné dynamické součinitele $\varphi_{fat,1}$, $\varphi_{fat,2}$. Pro zjednodušený výpočet lze použít součinitele ekvivalentního poškození λ podle tabulky 2.12 ČSN EN 1991-3. Součinitele určujeme v závislosti na kategoriích únavových účinků. Je uvažováno celkem 10 kategorií únavových účinků, S_0 až S_9 (viz. ČSN EN 1991-3, příloha B). Rozlišujeme součinitele ekvivalentního poškození způsobeného jednak rozkmitem normálového napětí λ_σ , jednak rozkmitem napětí smykového λ_τ . Ekvivalentní únavové zatížení je tedy dáno vztahy

$$Q_{e,\sigma} = \varphi_{fat,1} \cdot \lambda_\sigma \cdot Q_{C,r,max} + \varphi_{fat,2} \cdot \lambda_\sigma \cdot Q_{H,r,max}, \quad (26)$$

$$Q_{e,\tau} = \varphi_{fat,1} \cdot \lambda_\tau \cdot Q_{C,r,max} + \varphi_{fat,2} \cdot \lambda_\tau \cdot Q_{H,r,max}, \quad (27)$$

kde $Q_{C,r,max}$ je zatížení jedním kolem od tíhy jeřábu,
 $Q_{H,r,max}$ zatížení jedním kolem od maximálního zatížení kladkostroje.

Při posouzení na lokální účinky od kolového zatížení se má uvážit, že počet cyklů napětí je dvounásobný oproti počtu pracovních cyklů jeřábu. Příslušné ekvivalentní zatížení se získá za pomoci součinitele ekvivalentního poškození λ_σ pro kategorii únavových účinků o jednu třídu vyšší. Hodnotu součinitele γ_F únavového zatížení lze vyčíst v čl. 9.2 ČSN EN 1993-6.

3.6 Součinitele zatížení

Součinitele zatížení, nejsou-li uvedeny ve specifikacích dodavatele (jeřábu, nosníku JD) se uvažují hodnotami stanovenými dále.

3.6.1 Dílčí součinitele zatížení

Pro mezní stavy únosnosti podmíněné pevností konstrukčních materiálů (ve zkratce STR), v trvalých nebo dočasných návrhových situacích je dílčí součinitel dán hodnotou (viz tab. A.1.2(B)(CZ)-1 ČSN EN 1990)

$$\gamma_{G,sup} = 1,35. \quad (28)$$

Pro mezní stavy únosnosti STR v trvalých nebo dočasných návrhových situacích je dílčí součinitel zatížení jeřáby (viz tab. 6.3 ČSN EN 1991-3)

$$\gamma_Q = 1,35. \quad (29)$$

Doporučená hodnota dílčího součinitele únavového zatížení je (viz odst. 9.2.(1) ČSN EN 1993-6)

$$\gamma_{Ff} = 1,0. \quad (30)$$

3.6.2 Dynamické součinitele zatížení

Dynamická složka zatížení vyvolaná kmitáním v důsledku setrvačných a tlumících sil je obecně vyjádřena dynamickým součinitelem φ_i , kterým se násobí charakteristická hodnota statické složky zatížení (viz rovnice (2.1) ČSN EN 1991-3).

Vytvořený program pracuje s dynamickými součiniteli uvedenými v tabulce 2. Doporučené hodnoty a vztahy pro výpočet součinitelů jsou uvedeny v tabulkách 2.4 a 2.6 v normě ČSN EN 1991-3.

Tabulka 2 Druhy dynamických součinitelů

Dynamický součinitel	Uvažované účinky	Použije se pro
φ_1	Buzení vibrační konstrukce jeřábu při zvednutí zatížení kladkostroje ze země.	vlastní tíhu jeřábu
φ_2	Dynamické účinky zatížení kladkostroje při zvedání ze země k jeřábu	zatížení kladkostroje
φ_3	Dynamický součinitel náhlého uvolnění užitého zatížení	zatížení kladkostroje
φ_4	Dynamické účinky vznikající při pojezdu na jeřábových drahách.	vlastní tíhu jeřábu, zatížení kladkostroje
φ_5	Dynamické účinky vyvolané hnacími silami	hnací sílu

3.7 Kombinace zatížení

Současné působení svislých a vodorovných složek zatížení od jednoho jeřábu se má uvažovat jako jedna skupina zatížení. V každé z těchto skupin může být pouze jeden z pěti typů vodorovných sil od mostových jeřábů. Norma [6] udává celkem 9 skupin zatížení.

V programu byla vytvořena kombinační tabulka. Uživatel má možnost výběru z pěti skupin zatížení (viz tabulka 3). Přičemž každý z jeřábů může být zatěžován jinou skupinou.

Tabulka 3 Skupiny zatížení a dynamických součinitelů uvažovaných jako jedno charakteristické zatížení od jeřábu. [6]

	Druh nahodilého zatížení	Značka	Kapitola	Skupina zatížení					
				1	2	3	4	5	6
1	Vlastní tíha jeřábu	Q_C	2.6	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4
2	Zatížení kladkostroje	Q_H	2.6	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4
3	Zrychlení mostu jeř.	H_T, H_L	2.7	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-
4	Příčení mostu jeř.	H_S	2.7	-	-	-	-	1	-
5	Zrychlení nebo brzdění kočky	H_{T3}	2.7	-	-	-	-	-	1

Pro danou skupinu zatížení program vypočítá návrhové hodnoty sil:

a) k posouzení podle mezních stavů únosnosti se uvažuje základní kombinace (viz odst.

6.4.3.2(3) normy [4]), kterou lze vyjádřit výrazem

$$F_d = \sum_{j \geq 1}^n \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1}^n \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (31)$$

b) k posouzení podle mezních stavů použitelnosti se uvažuje charakteristická kombinace (viz odst. 6.5.3 (2) normy [4]), kterou lze vyjádřit výrazem

$$F_d = \sum_{j \geq 1}^n G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1}^n \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (32)$$

Ve výrazech a) a b) se používá těchto značek:

- F_d – návrhová hodnota kombinovaného zatížení,
- $G_{k,j}$ – charakteristická hodnota j -tého stálého zatížení,
- $Q_{k,i}$ – charakteristická hodnota i -tého proměnného zatížení,
- $\psi_{0,i}$ – kombinační součinitel pro kombinační hodnotu i -tého proměnného zatížení,
- $\gamma_{G,j}$ – dílčí součinitel j -tého stálého zatížení,
- $\gamma_{Q,i}$ – dílčí součinitel i -tého proměnného zatížení.

4 Vnitřní síly na nosníku JD

Pro posouzení nosníku a dílčích detailů je nutné stanovit jeho extrémní namáhání. Nejprve je potřeba analyzovat účinky jednotlivých zatížení působících na nosník a následně provést jejich kombinaci dle pravidel uvedených v kapitole 3.7.

4.1 Svislé zatížení od kol jeřábu

Je rozhodujícím zatížením pro celý nosník JD, neboť vyvolává největší namáhání. Tyto síly vyvozují maximální ohybový moment a posouvající sílu v příslušném řezu. Účinky všech ostatních zatížení budeme uvažovat v těchto řezech.

4.1.1 Maximální ohybový moment $M_{max,F}$

Zatížení svislými tlaky kol působí opakovaně a mění svou pozici v závislosti na provozu jeřábu. Je tedy nutné určit takovou polohu sil, která vyvodí nejnepříznivější účinky na

posuzovaný nosník. V praxi se to provádí tak, že podle Winklerova kritéria se stanoví aritmeticky střední břemeno F_k , tj. síla pod, kterou vznikne maximální ohybový moment. Aritmeticky střední břemeno F_k se poté umístí tak, aby byla středem nosníku půlena vzdálenost r mezi břemenem F_k a výslednicí soustavy R (tj. břemenové kritérium). Následně ze statických podmínek rovnováhy jsou určeny reakce a vypočteny ohybové momenty.

Vytvořený program simuluje pohyb jeřábu po nosníku. Pro každý krok vypočte a uloží hodnoty reakcí, posouvajících sil a ohybových momentů. Výsledné ohybové momenty porovná a uloží maximální hodnotu (viz příloha B).

4.1.2 Maximální posouvající síla $V_{max,F}$

Extrémní posouvající sílu na nosníku (tzn. reakci) od pohyblivé soustavy břemen lze určit na základě vyhodnocení různých postavení. Rozhoduje přitom nejnepríznivější poloha soustavy.

Vytvořený program dokáže všechny možné polohy břemen vyšetřit a určit maximální hodnoty posouvající síly (viz příloha B).

4.2 Vodorovné zatížení od kol jeřábu

Při kombinaci zatížení s maximálními svislými tlaky kol (obvykle skupina zatížení č. 1) působí na nosník JD dále:

- vodorovné podélné síly,
- příčné podélné síly.

4.2.1 Podélné vodorovné síly

Návrhovou hodnotu podélné vodorovné síly lze určit ve smyslu (31) podle vztahu

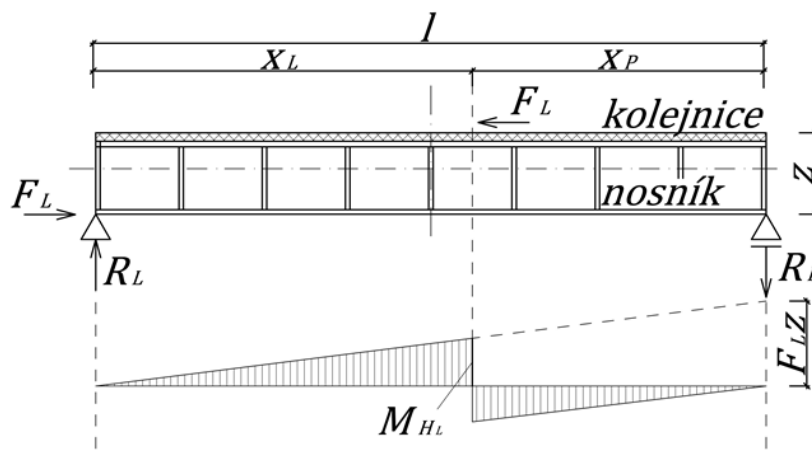
$$F_L = \gamma_Q \cdot \varphi_i \cdot H_{L,i}, \quad (33)$$

kde γ_Q je dílčí součinitel proměnného zatížení,
 φ_i příslušný dynamický součinitel (podle tabulky 2),
 $H_{L,i}$ podélná vodorovná síla (podle skupiny zatížení).

Síla F_L se přenáší hlavním nosníkem JD v podélném směru až do brzdného ztužidla (portálu). Zatížení namáhá celou průřezovou plochu hlavního nosníku osovou silou F_L . Vzhledem k tomu, že osová síla působí na excentricitě z od pevného uložení, vzniká také svislý ohybový moment M_L a podporové reakce R_L (obr. 20). Svislá vzdálenost temene kolejnice od podpory je

$$z = h + h_r, \quad (34)$$

kde h, h_r jsou výška hlavního nosníku a výška kolejnice.



Obr. 20 Výslednice brzdných sil podélného pojezdu obou jeřábů

Přídavný ohybový moment M_{HL} (obr. 20) uvažujeme v místě aritmetického středního břemene, nebo přibližně vyčíslíme uprostřed rozpětí nosníku. Pak ohybový moment určíme ze vztahů

$$R_L = \frac{1}{l} \cdot F_L \cdot z, \quad (35)$$

$$M_{HL} = R_L \cdot x_L, \quad (36)$$

kde R_L je podporová reakce,
 x_L vzdálenost posuzovaného řezu,
 z excentricita síly do pevného uložení nosníku.

4.2.2 Příčné vodorovné síly

Obecně jsou příčné vodorovné síly zachyceny vodorovným příhradovým nosníkem (obr. 21), jeho jeden pás je tvořen horní částí nosníku jeřábové dráhy. Tato část tedy přenáší osové síly N_T a místní ohybový moment M_T . Návrhovou hodnotu příčné síly lze určit ve smyslu (31) podle vztahu

$$F_T = \gamma_Q \cdot \varphi_i \cdot H_{T,i}, \quad (37)$$

kde γ_Q je dílčí součinitel proměnného zatížení,
 φ_i příslušný dynamický součinitel (podle tabulky 2),
 $H_{T,i}$ příčná vodorovná síla (podle skupiny zatížení).

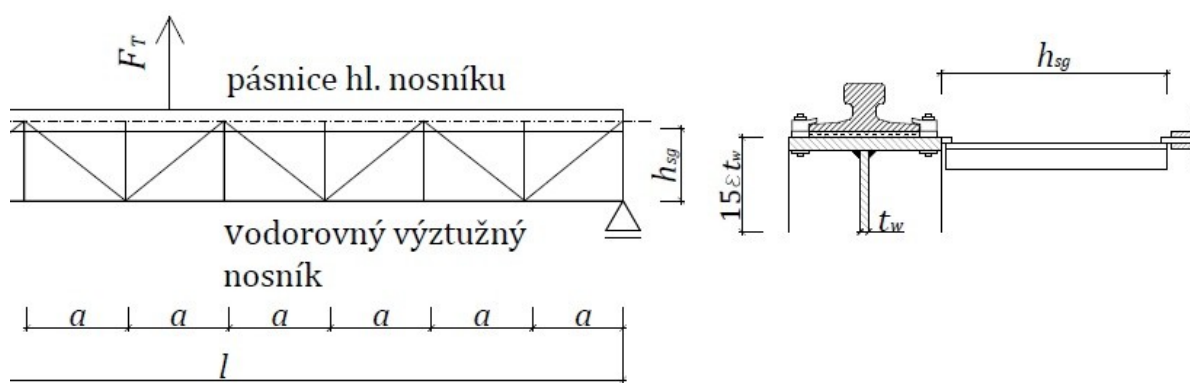
Při výpočtu osové síly N_T je možno vycházet z příčinkové čáry osových sil pásového prutu. Tento postup je pro algoritmizování velmi obtížný. A proto nebyl v programu

aplikován, ale uživatel má možnost stanovit normálovou sílu ručním výpočtem a vložit do programu.

Pás je ovšem současně namáhán místním ohybovým momentem M_T způsobeným mimostýčným zatížením příčnými silami F_T . Pás považujeme za spojitý nosník na pružných podporách, ohybový moment M_T (pro délku příhrady vodorovného výztužného nosníku a) je přibližně

$$M_T = 0,8 \frac{F_T \cdot a}{4}. \quad (38)$$

Vytvořený program vyhledá maximální příčnou sílu pro zvolenou skupinu zatížení a podle výše zmíněné podmínky vypočítá místní ohybový moment M_T .



Obr. 21 Vodorovný výztužný nosník a průřez hlavního nosníku JD

4.3 Vnitřní síly od stálého zatížení

Výpočet vnitřních sil od složek stálého zatížení (viz kap. 3.1) provede program ve dvou nejvíce namáhaných průřezech. V podporovém, kde budou vznikat největší posouvající síly. A v průřezu pod aritmetickým středním břemenem. Tedy v místě největšího ohybového momentu.

4.4 Rekapitulace vnitřních sil

Všechny výše zmíněné vnitřní síly program vytiskne do přehledné tabulky (obr. 22), ze které program načítá hodnoty nutné pro posouzení nosníku podle mezních stavů únosnosti (viz níže).

Zatížení	Postavení	N_{Ed}	$V_{z,Ed}$	$M_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$
		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
Stálé	postavení V_{max}	0,0	50,9	0,0	0,0
	postavení M_{max}	0,0	7,2	149,7	0,0
Svislá zatížení od kol jeřábu	postavení V_{max}	0,0	1086,8	0,0	0,0
	postavení M_{max}	0,0	294,8	2707,3	0,0
Vodorovná podélná síla		67,4	7,3	43,8	0,0
Vodorovné příčné síly		0,0	0,0	0,0	5,9

Obr. 22 Rekapitulace vnitřních sil na nosníku JD

5 Hlavní nosník jeřábové dráhy:

V případě vytvořeného programu se vždy bude jednat o prostý nosník. Podpory nosníku budou na hlavních sloupech budovy.

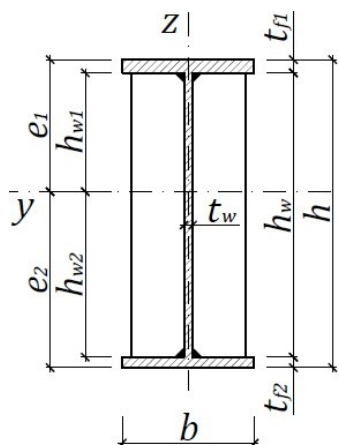
Při návrhu hlavního nosníku JD je třeba vycházet ze zásad ČSN EN 1993-1-1 [7], ČSN EN 1993-1-5 [8], ČSN EN 1993-1-8 [9], ČSN EN 1993-1-9 [10] a ČSN EN 1993-6 [11].

5.1 Návrh průřezu hlavního nosníku JD

Průřezy nosníku se navrhují v závislosti na rozponu a nosnosti projektovaných jeřábů, podle rozponů nosníků JD a v závislosti na příčném řezu haly (viz kapitola 2.2). Základní konstrukční řešení jeřábových drah byly uvedeny v kapitole 2.3.

Pro kratší nosníky JD, jež jsou zatěžovány lehkými, nebo středně těžkými jeřáby (viz kap. 2.3.1) je finančně výhodné navrhnout válcovaný průřez. V programu má uživatel na výběr z, válcovaných profilů typu I, IPE, HEA a HEB.

Pro větší rozpory jeřábových drah je výhodné použít jednoose souměrný svařovaný průřez s tlustší horní pásnicí (obr. 23). V řešené práci je možno použít průřez z předdefinované knihovny, nebo může uživatel zadat vlastní rozměry průřezu. Knihovna svařovaných nosníků byla vytvořena na základě podkladů uvedených ve skriptech [18].



Obr. 23 Průřez nosníku JD

Pro předběžný návrh hlavního nosníku středně těžkých jeřábů lze využít následující orientační zásady:

- $h \approx L/10$ pro prostý nosník a jeřáb 32 t až 50 t
- $h \approx L/15$ pro jeřáb 5 t
- $h/b \approx 3$ až 4
- plocha pásnic k celkové ploše $A_f/A \approx 0,5$ až 0,6
- štíhlost stojiny $h_w/t_w \approx 80$ až 100

Program ze zadaných rozměrů vypočítá potřebné průřezové parametry a vytiskne je do připravené tabulky (obr. 24).

Rozměry									
h	h_w	t_w	b	t_{f1}	t_{f2}	r_1	r_2	e_1	e_2
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1000	928	19	300	40	36	30	0	500,0	500,0
Statické veličiny-Průřezové charakteristiky									
I_y	$W_{el,y,1}$	$W_{el,y,2}$	$W_{pl,y}$	i_y	I_z	$W_{el,z,1}$	$W_{pl,z}$	i_z	
[mm ⁴]	[mm ³]	[mm ³]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ³]	[mm ³]	[mm]	
6,45E+09	1,29E+07	1,29E+07	1,49E+07	4,01E+02	1,63E+08	1,09E+06	1,72E+06	6,38E+01	

Obr. 24 Tabulka průřezových charakteristik

Při návrhu lze vycházet z hodnoty ohybového momentu pro kombinaci zatížení s maximálními tlaky kol jeřábů (tj. obvykle skupina zatížení 1). Pro každý zvolený průřez program vytiskne předběžné využití horní pásnice. Při návrhu nosníku JD na největší svislý moment se doporučuje využít horní vlákna cca na 60 až 75%. Rezerva totiž bude vyčerpána účinky ohybu ve vodorovné rovině a lokálním působením kola jeřábu.

5.2 Výběr pevnostní třídy oceli

Uživatel má na výběr ze 4 pevnostních tříd oceli (S235, S275, S355, S450). Podle zvolené pevnostní třídy a tloušťky posuzovaných částí průřezu program určí hodnoty meze kluzu f_y a meze pevnosti f_u (viz tabulka 4).

Tabulka 4 Jmenovité hodnoty meze kluzu f_y a pevnosti f_u v tahu [7]

Pevnostní třída oceli	Jmenovitá tloušťka prvků			
	$t \leq 40 \text{ mm}$		$40 \text{ mm} < t \leq 80 \text{ mm}$	
	f_y	f_u	f_y	f_u
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

5.3 Klasifikace průřezu

Výpočet normálových napětí v pásnici se provádí s ohledem na klasifikaci průřezu (viz čl. 5.5 ČSN EN 1993-1-1), pro niž použijeme parametr

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{235}}{f_y}. \quad (39)$$

Zatřídění průřezu je provedeno pro horní tlačnou pásnici a ohýbanou stojinu podle podmínek uvedených v tabulce 5.2 normy ČSN EN 1993-1-1. Uživatel má na výběr, zda posouzení horní pásnice bude provedeno podle pružného, nebo plastického rozdělení normálového napětí. Stojina je automaticky posuzována pružným výpočtem. Aby program pracoval správně, je nutné, aby jednotlivé části spadaly maximálně do 3. třídy průřezu, neboť u průřezu třídy 4 dochází vlivem lokálního boulení k jeho redukci, se kterou program nepočítá.

Doporučené hodnoty dílčích součinitelů únosnosti udává norma (viz čl. 6.1 ČSN EN 1993-6)

$$\gamma_{M0} = 1,00, \quad (40)$$

$$\gamma_{M1} = 1,00, \quad (41)$$

$$\gamma_{M2} = 1,25. \quad (42)$$

5.4 Mezní stav únosnosti

Mezní stav únosnosti – MSÚ (viz odst. 6.4.1(1) ČSN EN 1990) je nutné ověřit s ohledem na

- prostou pevnost průřezu,
- klopení nosníku,
- boulení štíhlých stěn,
- pevnost krčnicích svarů.

5.4.1 Posouzení pásnic v krajních vláknech nosníku

Posouzení se provádí v průřezu pod aritmeticky střední břemenem (viz kapitola 4.1.1), který je nejvíce namáhaným napětím $\sigma_{m,Ed}$, od návrhového ohybového momentu. Výpočet normálových napětí se provádí s ohledem na klasifikaci průřezu.

Výpočet normálových napětí

- V horním krajním vlákne

$$\sigma_{m,Ed,1} = \frac{M_{Ed}}{W_{el/pl,y,1}}, \quad (43)$$

- V dolním krajním vlákne

$$\sigma_{m,Ed,2} = \frac{M_{Ed}}{W_{el/pl,y,2}}, \quad (44)$$

kde M_{Ed} je návrhová hodnota ohybového momentu,
 $W_{el/pl,y,1}$ pružný/plastický průřezový modul pro horní vlákno nosníku,

$W_{el/pl,y,2}$ pružný/plastický průřezový modul pro spodní vlákno nosníku.

Únosnost průřezu při jednoosé napjatosti je kontrolována podle podmínky spolehlivosti (viz odst. 6.2.9.2(1) nebo 6.2.9.3(1) ČSN EN 1993-1-1), do níž dosadíme $\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,Ed} = \sigma_{m,Ed,1}$ a $\sigma_{m,Ed,2}$. Podmínka spolehlivosti je

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (45)$$

V horní pásnici je nutná rezerva oproti dosažení návrhové meze kluzu, protože k uvedeným napětím přibudou složky podélných a příčných účinků sil.

5.4.2 Posouzení stojiny v neutrální ose průřezu při maximálním smykovém napětí

Pro posouzení nosníku při namáhání smykem je rozhodující postavení soustavy břemen V_{max} při kterém působí extrémní posouvající síla $V_{max,F}$ (viz kapitola 4.1.2). Výsledná návrhová hodnota V_{Ed} je pak rovna součtu posouvajících sil od účinků stálého zatížení, svislých tlaků kol a excentricky působící osově síly.

Smykové napětí lze určit podle vztahu (viz odst. 6.2.6(4) ČSN EN 1993-1-1)

$$\tau_{v,Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t_w}, \quad (46)$$

kde V_{Ed} je návrhová hodnota posouvající síly ($V_{max,F} + V_G + R_L$),
 I_y moment setrvačnosti k ose y,
 t_w tloušťka stojiny.
 S_y Statický moment části průřezu nad těžišťovou osou, který se vypočte ze vztahu

$$S_y = \frac{1}{2} \cdot b \cdot e_1^2 - (b - t_w) \cdot h_{w1}^2, \quad (47)$$

kde b je šířka horní pásnice,
 e_1, h_{w1} vzdálenost vnější, resp. vnitřní hrany horní pásnice od těžišťové osy y.

Únosnost průřezu ověříme podle podmínky spolehlivosti (viz odst. 6.2.6(4) ČSN EN 1993-1-1) do níž dosadíme $\tau_{Ed} = \tau_{v,Ed}$. Podmínka spolehlivosti je

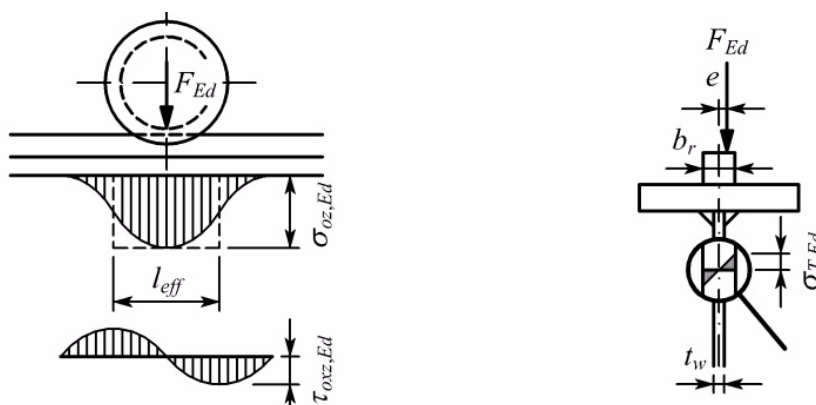
$$\tau_{Ed} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}{f_y} \leq 1. \quad (48)$$

5.4.3 Posouzení stojiny pod kolovým zatížením při interakci napětí

Interakci napětí je nutno prokázat v rozhodujících řezech nosníku. Tedy postačí dodržet příslušné podmínky spolehlivosti v průřezu, kde působí maximální ohybový moment (postavení břemen M_{max}) a v průřezu u podpory, kde působí největší posouvající síla (postavení břemen V_{max}). Vnitřní síly vyvozují na nosníku globální a lokální účinky zatížení (viz níže).

Ohybový moment M_{Ed} vyvozuje na okraji stojiny globální ohybové napětí $\sigma_{m,Ed}$, posouvající síla V_{Ed} vyvozuje globální smykové napětí $\tau_{v,Ed}$. Kolové zatížení F_{Ed} působící na horní pásnici vyvozuje ve stojině lokální napětí (obr. 25):

- lokální svislé tlakové napětí $\sigma_{oz,Ed}$ (viz čl. 5.7.1 ČSN EN 1993-6),
- lokální smykové napětí $\tau_{oxz,Ed}$ (viz čl. 5.7.2 ČSN EN 1993-6),
- lokální ohybové napětí $\sigma_{T,Ed}$, jež vzniká v důsledku excentricity kolového zatížení (viz čl. 5.7.3 ČSN EN 1993-6).



Obr. 25 Lokální tlakové, smykové a ohybové napětí pod kolovým zatížením [11]

5.4.3.1 Napětí od svislých sil

Globální ohybové napětí lze určit ze vztahu

$$\sigma_{m,Ed} = \frac{M_{Ed}}{I_y} \cdot h_{w1}, \quad (49)$$

kde M_{Ed} je návrhová hodnota ohybového momentu,

h_{w1} výška tlačené stojiny,

I_y moment setrvačnosti průřezu hlavního nosníku k těžišťové ose y .

Globální smykové napětí lze určit ze vztahu

$$\tau_{v,Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S_{f1,y}}{I_y \cdot t_w}, \quad (50)$$

kde V_{Ed} je návrhová hodnota posouvající síly,
 I_y moment setrvačnosti k ose y,
 t_w tloušťka stojiny,
 $S_{f1,y}$ statický moment horní pásnice k těžišťové ose y, který se vypočte ze vztahu

$$S_{f1,y} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot t_{f1} \cdot 2 \cdot e_1 - t_{f1} \quad (51)$$

kde b, t_{f1} jsou šířka a tloušťka horní pásnice,
 e_1 vzdálenost horního okraje vlákna od těžišťové osy y.

Lokální svislé tlakové napětí lze určit podle vztahu (viz odst. 5.7.1(1) ČSN EN 1993-6)

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{Ed}}{l_{eff} \cdot t_w} \quad (52)$$

kde F_{Ed} je návrhová hodnota kolového zatížení,
 l_{eff} účinná roznášecí šířka,
 t_w tloušťka stojiny.

Účinná roznášecí délka, na níž lze předpokládat rovnoměrný přenos lokálního svislého napětí (viz odst. 5.7.1(2) ČSN EN 1993-6), se určuje v závislosti na způsobu připojení a uložení jeřábové kolejnice k pásnici nosníku (tabulka 5).

Tabulka 5 Účinná roznášecí délka l_{eff} [11]

Případ	Popis	Účinná roznášecí délka l_{eff}
(a)	Jeřábová kolejnice neposuvně připojená k pásnici	$l_{eff} = 3,25 \cdot I_{rf}/t_w^{1/3}$
(b)	Jeřábová kolejnice neposuvně nepřipojená k pásnici	$l_{eff} = 3,25 \cdot (I_r + I_{f,eff})/t_w^{1/3}$
(c)	Jeřábová kolejnice uložena na vhodné elastomerové roznášecí podložce tlusté aspoň 6mm	$l_{eff} = 4,25 \cdot (I_r + I_{f,eff})/t_w^{1/3}$
$I_{f,eff}$	moment setrvačnosti pásnice o účinné šířce b_{eff} k její vodorovné těžišťové ose	
I_r	moment setrvačnosti kolejnice k její vodorovné těžišťové ose	
I_{rf}	moment setrvačnosti průřezu složeného z kolejnice a pásnice o účinné šířce b_{eff}	
t_w	tloušťka stojiny	

$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f$ ale $b_{eff} \leq b$	
kde b	je šířka horní pásnice,
b_{fr}	šířka paty kolejnice,
h_r	výška kolejnice
t_f	tloušťka pásnice.
Poznámka: Při určení I_r , I_{rf} a h_r se počítá s opotřebením kolejnice, viz 5.6.2(2) a 5.6.2.(3)	

Při výpočtu se má brát v úvahu opotřebení kolejnice, jež je rovné 25% tloušťky materiálu pod pojižděným povrchem (viz odst. 5.6.2(2) ČSN EN 1993-6). Knihovna kolejnic (viz tabulka 1) obsahuje potřebné redukované hodnoty průřezových charakteristik, se kterými program pracuje.

Největší lokální smykové napětí se má rovnat 20% maximálního svislého napětí $\sigma_{oz,Ed}$ (viz odst. 5.7.2(1) ČSN EN 1993-6)

$$\tau_{oz,Ed} = 0,2 \cdot \sigma_{oz,Ed}. \quad (53)$$

Lokální ohybové napětí se může určit podle vztahu (viz odst. 5.7.3(1) ČSN EN 1993-6)

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6 \cdot T_{Ed}}{a \cdot t_w^2} \cdot \eta \cdot tgh(\eta), \quad (54)$$

$$\eta = \frac{0,75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_{f1,t}} \cdot \frac{\sinh^2 \frac{\pi \cdot h_w}{a}}{\sinh \frac{2\pi \cdot h_w}{a} - \frac{2\pi \cdot h_w}{a}}, \quad (55)$$

kde T_{Ed} je krouticí moment způsobený příčnou excentricitou,
 a vzdálenost příčných výztuh stojiny,
 h_w výška stojiny,
 t_w tloušťka stojiny (viz obr. 22).

Moment tuhosti v prostém kroucení $I_{f1,t}$ horní pásnice se vypočte ze vztahu

$$I_{f1,t} = \frac{1}{3} b - 0,63 t_{f1} \cdot t_{f1}^3. \quad (56)$$

Krouticí moment T_{Ed} způsobený příčnou excentricitou e kolového zatížení se má určit podle vztahu (viz odst. 5.7.3(2) ČSN EN 1993-6)

$$T_{Ed} = F_{Ed} \cdot e, \quad (57)$$

kde F_{Ed} je návrhová hodnota kolového zatížení,
 e excentricita kolového zatížení, jejíž hodnota je dle vztahu (viz odst. 2.5.2.1(2) ČSN EN 1993-6)

$$e = 0,25 \cdot b_r, \text{ ale } e \geq 0,5 \cdot t_w \quad (58)$$

kde b_r je šířka jeřábové kolejnice.

5.4.3.2 Napětí od vodorovných sil

Podélné vodorovné síly vyvozují na nosníku normálovou sílu, posouvací síly a svislý ohybový moment (tj. N_L , R_L , M_L).

Globální tlakové napětí od normálové síly N_L podle vztahu

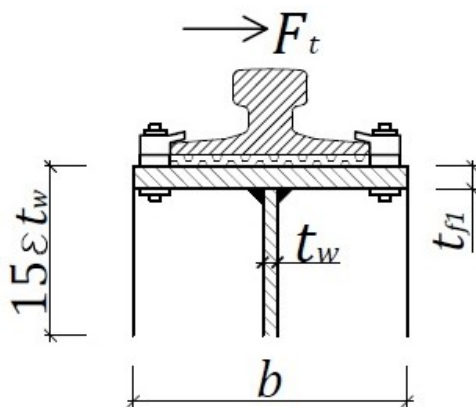
$$\sigma_{c,L,Ed} = \frac{N_L}{A}, \quad (59)$$

kde A je plocha celého průřezu nosníku JD.

Globální smykové a ohybové napětí, jež jsou vyvozeny vnitřními silami R_L , resp. M_L určíme stejným postupem jako ve vzorcích (49),(50).

Příčné vodorovné síly vyvozují na nosníku normálovou sílu a místní ohybový moment (tj. N_T , M_L). Tyto účinky nepřenáší celý průřez, ale pouze jeho část (obr. 26). Osovou sílu přenáší horní pás hlavního nosníku a část stojiny o výšce $15\epsilon t_w$ (s přihlédnutím k odst. 5.4(1) ČSN EN 1993-1-5),(pro ϵ viz (39)). Průřezová plocha pásu

$$A_{ch} = b t_{f1} + 15\epsilon t_w^2, \quad (60)$$



Obr. 26 Průřez přenášející příčnou sílu

Tlakové napětí od osově síly N_T lze poté určit podle vztahu

$$\sigma_{c,T,Ed} = \frac{N_T}{A_{ch}}. \quad (61)$$

Místní ohybový moment M_T vyvozuje v krajních vláknech horní pásnice ohybové napětí, jež lze určit podle vztahu

$$\sigma_{mT,Ed} = \frac{M_T}{W_{f1,el,z}}, \quad (62)$$

kde $W_{f1,el,z}$ je pružný průřezový modul horní pásnice k těžišťové ose z.

Posouzení stojiny pro kombinaci se svislými i vodorovnými složkami zatížení ověříme podle podmínky spolehlivosti (66), do níž dosadíme za účinky zatížení

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{m,Ed} + \sigma_{mL,Ed} + \sigma_{cL,Ed} + \sigma_{cT,Ed}, \quad (63)$$

$$\sigma_{z,Ed} = \sigma_{oz,Ed} + \sigma_{T,Ed}, \quad (64)$$

$$\tau_{Ed} = \tau_{v,Ed} + \tau_{oxz,Ed}. \quad (65)$$

Únosnost okraje stojiny při dvouosé napjatosti ověříme podle podmínky spolehlivosti (viz odst. 6.2.5.1(5) ČSN EN 1993-1-1)

$$(\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3\tau_{Ed}^2) \cdot \frac{\gamma_{M0}}{f_y} \leq 1. \quad (66)$$

Program byl vytvořen tak, aby byly posouzeny oba extrémně namáhané průřezy (tj. podporový průřez a průřez s maximálním ohybovým momentem).

5.4.4 Posouzení pásnic pro kombinaci se svislými i vodorovnými silami

Únosnost pásnic při jednoosé napjatosti ověříme podle podmínky spolehlivosti (45), do níž za účinky sil dosadíme

- účinek zatížení v horní pásnici

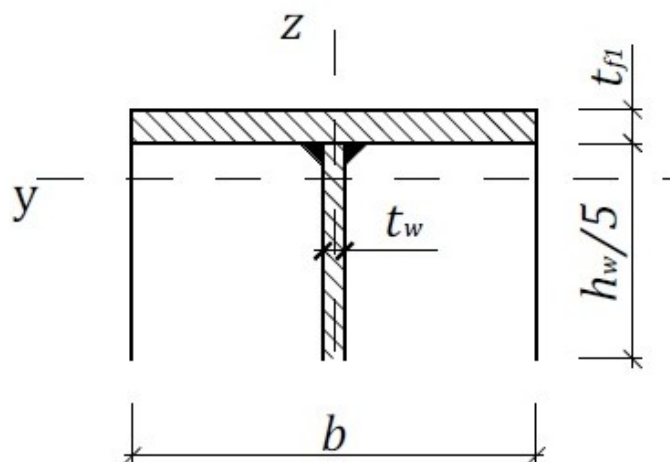
$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{m,Ed} + \sigma_{mL,Ed} + \sigma_{mT,Ed} + \sigma_{cL,Ed} + \sigma_{cT,Ed}, \quad (67)$$

- účinek zatížení v dolní pásnici

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{m,Ed} + \sigma_{mL,Ed} + \sigma_{cL,Ed}. \quad (68)$$

5.4.5 Posouzení hlavního nosníku jeřábové dráhy na klopení

Momentovou únosnost nosníku JD při klopení (viz čl. 6.3.2 ČSN EN 1993-6) lze ověřit jako vzpěrnou únosnost konvenčního tlačného pásu při rovinném vzpěru (viz odst. 6.3.2.3(1) ČSN EN 1993-6), (obr. 27). Tlakovou osovou sílu konvenčního pásu lze uvažovat rovnu ohybovému momentu od svislého zatížení vydělenému vzdáleností těžišť pásnic. Vzdálenost průřezu tlačného pásu L_c zajištěných proti vybočení z roviny ohybu je rovna délce příhrady vodorovného výztužného nosníku a .



Obr. 27 Průřez konvexního tlačného pásu

hlavního nosníku JD

Plochu a moment setrvačnosti konvexního tlačného pásu určíme podle vztahů

$$A_c = b \cdot t_{f1} + \frac{h_w \cdot t_w}{5}, \quad (69)$$

$$I_c = \frac{1}{12} \cdot t_{f1} \cdot b^3 + \frac{h_w \cdot t_w^3}{5}. \quad (70)$$

Poměrnou štíhlost pásu lze stanovit z výrazu (viz odst. 6.3.1.3(1) ČSN EN 1993-1-1),

$$\lambda = \frac{L_c}{\pi} \sqrt{\frac{A_c \cdot f_y}{E \cdot I_c}}. \quad (71)$$

Je-li štíhlost pásu $\lambda \leq 0,2$, pak klopení není nutno uvažovat (viz odst. 6.3.1.2(4) ČSN EN 1993-1-1). Není-li podmínka splněna, je nutné vypočítat vzpěrnou únosnost konvexního tlačného pásu (podle kap. 6.3 v ČSN EN 1993-1-1) a posoudit, jestli platí daná podmínka

$$N_{c,max} \leq N_{c,b,Rd}, \quad (72)$$

kde $N_{c,max}$ je osová síla v konvexním tlačném pásu,

$N_{c,b,Rd}$ vzpěrná únosnost konvexního tlačného pásu.

5.4.6 Posouzení nosníku JD na boulení

Štíhlé průřezy nosníků vykazují sníženou únosnost vlivem lokálního boulení stěn a je proto nutné provést příslušná posouzení (viz čl. 6.5 a 6.6 ČSN EN 1993-6). Obecně je štíhlý průřez nosníku JD namáhán osovou silou N_{ED} , ohybovým momentem M_{ED} , posouvací silou V_{Ed} a lokálně příčnou silou F_{Ed} .

5.4.6.1 Rozmístění příčných výztuh

Stojiny nosníků namáhané smykem se štíhlostí

$$\frac{h_w}{t_w} \geq \frac{72 \cdot \varepsilon}{\eta}, \quad (73)$$

kde h_w, t_w je výška a tloušťka stojiny,

$$\eta = 1,2 \cdot \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M1}} \text{ pro ocel S235, S275, S350,}$$

$$\eta = 1,05 \cdot \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M1}} \text{ pro ocel S450,}$$

ε parametr (viz rovnice (55)),

mají být příčně vyztuženy alespoň v místech podpor (viz odst. 5.1(2) ČSN EN 1993-1-5). Je-li štíhlost naopak menší, jedná se o kompaktní stojinu a vliv smykového boulení můžeme zanedbat. Stojina by se pak posuzovala na prostou smykovou pevnost a únosnost na příčné síly.

Vytvořený program bez ohledu na štíhlost stojiny provede posouzení průřezu s ohledem na smykové boulení. Byly naprogramovány příslušná posouzení, jež umožní efektivnější návrh průřezu nosníku JD.

5.4.6.2 Podmínky spolehlivosti

Je-li štíhlý průřez při téže kombinaci namáhán osovou silou N_{Ed} a ohybovým momentem M_{Ed} má být splněna podmínka spolehlivosti (viz odst. 4.6(1) ČSN EN 1993-1-5)

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (74)$$

Je-li štíhlý průřez při nejnepříznivější kombinaci zatížení namáhán posouvací silou V_{Ed} a ohybovým momentem M_{Ed} má být splněna podmínka spolehlivosti (viz odst. 5.5(1), 5.2(1) ČSN EN 1993-1-5)

$$\frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd}} \leq 1,0, \quad (75)$$

kde $V_{bw,Rd}$ je příspěvek stojiny k návrhové únosnosti ve smyku,

$V_{bf,Rd}$ příspěvek pásnic k návrhové únosnosti ve smyku.

Je-li štíhlá stojina v nevyztuženém místě namáhána příčnou silou F_{Ed} , má být splněna podmínka spolehlivosti (viz odst. 6.6(1), 6.2(1) ČSN EN 1993-1-5)

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0, \quad (76)$$

kde F_{Rd} je návrhová únosnost při místním příčném zatížení.

Štíhlý průřez namáhán současně ohybovým momentem M_{Ed} a posouvací silou V_{Ed} vyhoví, platí-li

$$M_{Ed} \leq M_{f,Rd} \wedge V_{Ed} \leq V_{bw,Rd}, \quad (77)$$

přičemž hodnota $M_{f,Rd}$ se redukuje vynásobením součinitelem (viz odst. 5.4(2) ČSN EN 1993-1-5)

$$1 - \frac{N_{Ed}}{\rho}, \quad (78)$$

kde ρ je návrhová osová únosnost průřezu složeného pouze z pásnic (555).

Není-li splněna podmínka (77), lze interakci ohybu a smyku posoudit podle sofistikovaných postupů uvedených v kapitole 5 a 7 v normě ČSN EN 1991-1-5, ve vytvořeném programu tyto výpočty nejsou aplikovány.

Je-li štíhlý průřez při téže kombinaci zatížení současně namáhán osovou silou N_{Ed} , ohybovým momentem M_{Ed} a osamělou příčnou silou F_{Ed} , má být splněna podmínka (viz odst. 7.2(1), 6.6(1), 6.2(1), 4.6(1) ČSN EN 1993-1-5 a 6.2.9.3(1), 6.2.9.3(2) ČSN EN 1993-1-1)

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} + 0,8 \cdot \sigma_{x,Ed} \cdot \frac{\gamma_{M0}}{f_y} \leq 1,4. \quad (79)$$

Pro jednotlivá posouzení nosníku jeřábové dráhy na boulení tedy potřebujeme stanovit následující únosnosti.

5.4.6.3 Únosnost ve smyku

Příspěvek k únosnosti ve smyku zahrnující působení částečného tahového pole stojiny se určí ze vztahu (viz rovnice (5.2) ČSN EN 1993-1-5)

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{3 \cdot \gamma_{M0}}, \quad (80)$$

kde χ_w je součinitel boulení, který lze získat ze vztahů v tabulce 6 (viz 5.3(1) 1993-1-5).

Tabulka 6 Součinitel příspěvku stojiny χ_w k únosnosti v boulení při smyku [8]

	Tuhá koncová výztuha	Netuhá koncová výztuha
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

kde λ_w je poměrná štíhlost stojiny (viz rovnice 5.3(3) EN 1993-1-5), jež lze určit ze vztahů

- příčné výztuhy jsou pouze nad podporami

$$\lambda_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon}, \quad (81)$$

- příčné výztuhy jsou nad podporami i v poli

$$\lambda_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \overline{k_\tau}}, \quad (82)$$

kde k_τ je součinitel kritického napětí ve smyku, jež se vypočítá podle vztahu (A.3(1) ČSN EN 1993-1-5)

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \cdot h_w/a^2, \quad (83)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 \cdot h_w/a^2. \quad (84)$$

Příspěvek k únosnosti ve smyku zahrnující zvětšení účinků tahového pole v důsledku lokální ohybové únosnosti pásnic se stanoví ze vztahu (viz odst. 5.4(1) ČSN EN 1993-1-5).

$$V_{bf,Rd} = \frac{b \cdot t_{f2}^2 \cdot f_y}{c \cdot \gamma_{M1}}, \quad (85)$$

kde b, t_{f2} je šířka a tloušťka spodní pásnice,
 c délka ukotvení tahového pole, která se vypočte ze vztahu

$$c = a \cdot 0,25 + \frac{1,6 \cdot b \cdot t_{f2}^2}{t_w \cdot h_w^2}. \quad (86)$$

Lze zahrnout do únosnosti ve smyku při boulení jen tehdy, jestliže únosnost pásnic není plně využita na ohybový moment.

5.4.6.4 Únosnost při místním příčném zatížení

Návrhová únosnost při místním příčném zatížení se stanoví ze vztahu (viz odst. 6.2(1) ČSN EN 1993-1-5)

$$F_{Rd} = \frac{\chi_F \cdot l_y \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (87)$$

kde l_y je účinná zatěžovací délka (viz dále),
 t_w tloušťka stojiny,
 f_y, γ_{M1} mez kluzu a dílčí součinitel spolehlivosti materiálu,
 χ_F součinitel boulení, jež získáme ze vztahu (viz rovnice (6.3) ČSN EN 1993-1-5),

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F}, s \text{ omezením } \chi_F \leq 1, \quad (88)$$

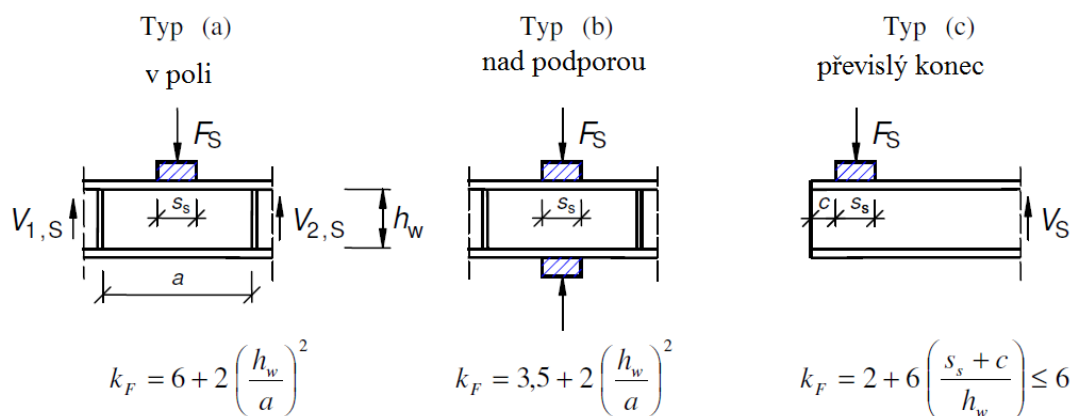
kde λ_F je poměrná štíhlost, která se vypočte z vzorce (6.4) v ČSN EN 1993-1-5

$$\lambda_F = \frac{\overline{l_y \cdot t_w \cdot f_y}}{F_{cr}}, \quad (89)$$

kde F_{cr} je kritická síla, která lze vyčíst ze vztahu (6.5) v ČSN EN 1993-1-5

$$F_{cr} = 0,9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}, \quad (90)$$

kde k_F je součinitel kritické síly, který se pro přenos příčného zatížení smykovými silami získá ze vzorců na obr. 28 (viz 6.1 ČSN EN 1993-1-5).



Obr. 28 součinitel kritické síly pro různé typy zavedení zatížení [8]

Účinná roznášecí délka l_y se pro přenos příčného zatížení smykovými silami ve stojině vypočte pro typ A a B (viz obr. 28) ze vztahu (viz odst. 6.5(2) ČSN EN 1993-1-5)

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot 1 + \overline{m_1 + m_2}, \quad (91)$$

kde m_1, m_2 jsou bezrozměrné parametry, vypočteme takto (viz 6.5 ČSN EN 1993-1-5)

$$m_1 = \frac{b}{t_w}, \quad (92)$$

$$m_2 = 0,02 \cdot \frac{h_w^2}{t_{f1}^2} \text{ pro } \lambda_F, \text{ jinak } m_2 = 0, \quad (93)$$

Roznášecí délka s_s na horním povrchu pásnice od zatížení kolem jeřábu působící na kolejnici se může získat ze vztahu

$$s_s = l_{eff} - 2 \cdot t_{f1}, \quad (94)$$

kde l_{eff} je účinná roznášecí délka určená podle tabulky 5.1 v normě 1993-6 (viz tabulka 5).

5.4.6.5 Únosnost při působení normálových napětí

Návrhová plastická momentová únosnost průřezu složeného pouze z účinných ploch pásnic, která se využije v podmínce (77), se určí podle vztahu (viz odst. 7.1(3) ČSN EN 1993-1-5)

$$M_{f,Rd} = \frac{W_{f,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (95)$$

kde $W_{f,y}$ je plastický modul průřezu složeného z účinných ploch pásnic, který se může vzít jako součin účinné plochy pásnice s menší osovou únosností a vzdálenosti mezi těžišti pásnic, tj.

$$W_{f,y} = 0,5bt_{f2}(h + h_w). \quad (96)$$

Návrhová osová únosnost průřezu složeného pouze z pásnic, která se použije v korekčních součinitelích (77),(78) se stanoví z výrazu

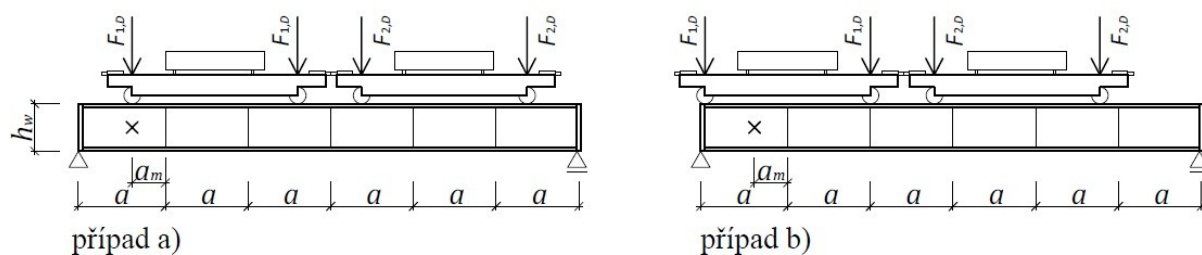
$$\rho = \frac{A_{f1} + A_{f2}}{\gamma_{M0}} \cdot f_y. \quad (97)$$

5.4.6.6 Posouzení rozhodujících průřezů

Pro posouzení hlavního nosníku JD na boulení rozhoduje kombinace zatížení zahrnující stálé zatížení a zatížení jeřáby (obvykle skupina zatížení č. 1), jakožto hlavní proměnné zatížení.

Posouzení se provádí pro tyto dva případy:

- nejprve uvažíme postavení svislých tlaků kol tak, aby uvažované pole bylo namáháno současně poměrně velkou posouvající silou, ohybovým momentem a osamělým břemenem (případ a)), (obr. 29),
- ve druhém případě vyjdeme z hlediska působení maximální posouvající síly a současně místního břemene (případ b)), (obr. 29).



Obr. 29 Postavení soustavy břemen pro posouzení stojiny

Mění-li se moment M po délce pole stojiny $a \times h_w$ lemovaného po všech stranách pásnicemi nebo příčnými výztuhami, posuzuje se průřez ve vzdálenosti $a_m = \min 0,4a; 0,5h_w$ od příčné výztuhy na více namáhané straně pole (viz odst. 4.6(3) ČSN EN 1993-1-5), (obr. 29).

V prezentovaném programu má uživatel možnost zadat libovolnou vzdálenost posuzovaného řezu. Pro výpočet maximálních účinku v posuzovaném řezu byly vytvořeny procedury. Pomocí nich jsou prověřeny všechny možnosti postavení pohyblivé soustavy břemen a vytisknuty maximální hodnoty vnitřních sil v daném průřezu.

5.4.7 Posouzení výztuh

Program obsahuje i posouzení koncových a mezilehlých příčných výztuh. Pomocí něj lze snadno posoudit tuhost a pevnost výztuhy. A také zajistit účinné podepření tlačené pásnice.

5.4.7.1 Posouzení koncových výztuh

Koncové výztuhy (neboli čelní desky) jsou posuzovány na vzpěr jako tlačенý prut, přenášející maximální reakce v podpoře nosníku (viz odst. 9.3.2(1) ČSN EN 1993-1-5). Podmínka spolehlivosti pro maximální reakci R_{Ed} je tedy (viz odst. 6.3.1(1) ČSN EN 1993-1-1)

$$\frac{R_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1, \quad (98)$$

kde $N_{b,Rd}$ je návrhová vzpěrná únosnost fiktivního prutu, která se vypočte ze vztahu (viz odst. 6.3.1.1(3) ČSN EN 1993-1-1),

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{st} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (99)$$

kde χ je součinitel vzpěrnosti,

A_{st} účinná plocha výztuhy,

f_y, γ_{M1} mez kluzu a dílčí součinitel spolehlivosti materiálu.

Součinitel vzpěrnosti se určí ze vztahu (viz 6.3.1.2(1) ČSN EN 1993-1-1)

$$\chi = \frac{1}{\phi + \frac{1}{\phi^2 - \lambda^2}}, \text{ ale } \chi \leq 1, \quad (100)$$

kde $\Phi = 0,5 \cdot 1 + \alpha \cdot \lambda - 0,2 + \lambda^2$,

α je součinitel imperfekce, závisí na křivce vzpěrné pevnosti (viz tab. 6.1 ČSN EN 1993-1-1),

λ poměrná štíhlost výztuhy určíme ze vztahu (viz odst. 6.3.1.3 (1) ČSN EN 1993-1-1),

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{\pi} \sqrt{\frac{A_{st} \cdot f_y}{E \cdot I_{st}}}, \quad (101)$$

kde E je modul pružnosti v tahu a tlaku,

I_{st} moment setrvačnosti účinného průřezu (viz obr...)

A_{st} účinná plocha výztuhy (viz obr...)

L_{cr} vzpěrná délka výztuhy, lze stanovit z výrazu (viz odst. 6.3.1.3(2) ČSN EN 1993-1)

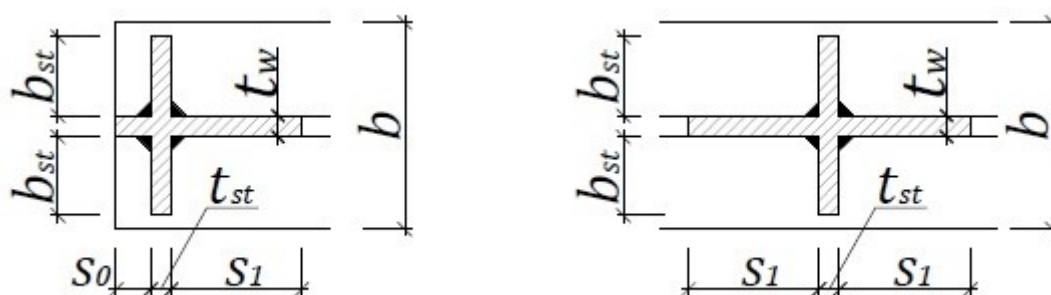
$$L_{cr} = 0,75 \cdot h_w. \quad (102)$$

Do účinné plochy se započítává průřez vlastních výztužných prvků a spolupůsobící část stojiny o šířce $s_1 = 15 \cdot \varepsilon \cdot t_w$. Tuto část přičítáme po obou stranách výztuhy, ale ne více než skutečné rozměry stojiny (viz odst. 9.1(2) ČSN EN 1993-1-5). Účinný průřez koncové výztuhy lze tedy vyčíst ze vztahu

$$A_{st} = t_{st} \cdot 2 \cdot b_{st} + t_w \cdot (s_1 + s_0) \cdot t_w. \quad (103)$$

Moment setrvačnosti koncové výztuhy se vypočte

$$I_{st} = \frac{1}{12} \cdot t_{st} \cdot 2 \cdot b_{st}^3 + (s_1 + s_0) \cdot t_w^3. \quad (104)$$



Obr. 30 Příčné výztuhy (zleva: koncová, mezilehlá)

5.4.7.2 Posouzení mezilehlých výztuh

Výztuhy se posuzují z hlediska

- tuhosti, aby se prokázalo, že zůstanou účinné i při podkritickém namáhání stojiny,
- pevnosti, aby se ověřilo, že spolehlivě přenesou působící namáhání.

a) Posouzení výztuhy na tuhost

Výztuha tvoří tuhou podporu boulicím panelům, pokud moment setrvačnosti účinného průřezu mezilehlé výztuhy splňuje podmínku (viz odst. 9.3.3(3) ČSN EN 1993 -1-5)

$$pro \frac{a}{h_w} < \bar{2}: I_{st} \leq \frac{1,5 \cdot h_w^3 \cdot t_w^3}{a^2}, \quad (105)$$

$$pro \frac{a}{h_w} \geq \bar{2}: I_{st} \leq 0,75 \cdot h_w^3 \cdot t_w^3. \quad (106)$$

Průřezová plocha mezilehlé výztuhy (viz obr. 30) je rovna

$$A_{st} = t_{st} \cdot 2 \cdot b_{st} + t_w + 2 \cdot s_1 \cdot t_w. \quad (107)$$

Moment setrvačnosti k ose rovnoběžné se stojinou vypočteme podle vztahu

$$I_{st} = \frac{1}{12} \cdot t_{st} \cdot 2 \cdot b_{st} + t_w^3 + 2 \cdot s_1 \cdot t_w^3. \quad (108)$$

b) Posouzení výztuhy na pevnost

Mezilehlá výztuha se posuzuje na vzpěrnou únosnost pro osovou sílu (viz odst. 9.4(2), 9.3.3(3) a 9.2.1(6) ČSN EN 1993-1-5)

$$N_{st,Ed} = F_{Ed} + N_{st,ten} + \Delta N_{st}, \quad (109)$$

kde F_{Ed} je příčná síla působící v místě výztuhy,
 $N_{st,ten}$ tlaková síla vyvolaná pokritickým působením stojiny ve smyku,
 ΔN_{st} přírůstek tlakové síly zahrnující přídavné účinky pokritického působení stojiny v tlaku nebo ohybu. V našem případě lze zanedbat $\Delta N_{st}=0$ (viz 9.2.1.6 v ČSN EN 1993-1-5).

Pro výpočet tlakové síly $N_{st,ten}$ lze použít vztahu

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{h_w \cdot t_w}{\lambda_w^2} \frac{f_y}{3 \cdot \gamma_{M1}}, \text{ ale } N_{st,ten} \geq 0, \quad (110)$$

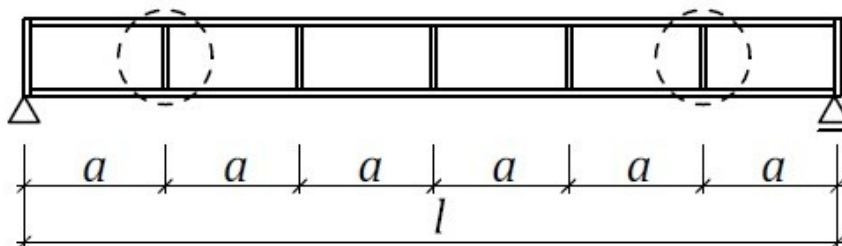
kde V_{Ed} je větší z posouvajících sil po obou stranách posuzované výztuhy,
 f_y, γ_{M1} mez kluzu a dílčí součinitel materiálu,
 λ poměrná štíhlost stojiny ve smyku.

V programu byla vytvořena procedura (viz příloha B), která určí hodnotu posouvající síly v zadaném řezu. A z ní dále vypočítá složku tlakové síly $N_{st,ten}$. Uživatel zadá vzdálenost posuzované příčné výztuhy a vyvolá proceduru. Tím dojde k určení polohy pohyblivé soustavy břemen, při které je vyvozena největší posouvající síla. Nejvíce namáhané mezilehlé výztuhy jsou u koncového stojinového pole nosníku (obr. 31), proto je vhodné provést výpočet pro obě příčné výztuhy a následně posoudit více namáhanou.

Mezilehlá výztuha se posuzuje na vzpěr stejně jako tlačенý prut podle podmínky spolehlivosti (viz odst. 6.3.1.1(1) ČSN EN 1993-1-1)

$$\frac{N_{st,Ed}}{N_{st,b,Rd}} \leq 1, \quad (111)$$

kde $N_{st,b,Rd}$ je návrhová vzpěrná únosnost fiktivního prutu podle (99), kde dosadíme průřezovou plochu A_{st} (107) a moment setrvačnosti podle I_{st} (108).



Obr. 31 Nejvíce namáhané mezilehlé výztuhy

5.4.7.3 Posouzení účinného podepření tlačенé pásnice stojinou

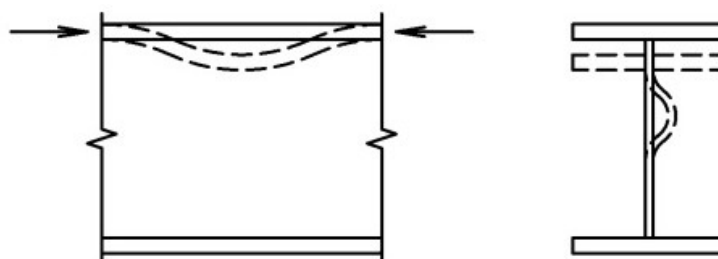
Stojiny nosníku mají zabezpečovat dostatečné podepření tlačенým pásnicím. Aby nedošlo k vtlačení pásnic do stojiny nosníku (obr. 32), má štíhlost stojiny h_w/t_w splňovat podmínku (viz odst. 8(1) ČSN EN 1993-1-5)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{k E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}, \quad (112)$$

kde k součinitel ($k = 0,3$ pro pásnice třídy průřezu 1, $k = 0,4$ pro třídu průřezu 2, $k = 0,55$ pro třídu průřezu 3-4),

A_w plná plocha stojiny, $A_w = h_w \cdot t_w$,

A_{fc} účinná plocha tlačенé pásnice, $A_{fc} = b \cdot t_{f1}$.



Obr. 32 Vtlačení pásnice do stojiny [17]

5.4.8 Posouzení svaru

Koutové svary, spojující stojinu a pásnici nosníku, se posuzují metodou uvažující směr namáhání (viz čl. 4.5.3.2 ČSN EN 1993-1-8) pro složky napětí σ_{\perp} , τ_{\perp} a σ_{\parallel} podle podmínek spolehlivosti

$$\overline{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}, \quad (113)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (114)$$

kde	σ_{\perp}	je	normálové napětí kolmé k účinnému průřezu svaru,
	τ_{\perp}		smykové napětí (v rovině účinného průřezu) kolmé k ose svaru,
	σ_{\parallel}		smykové napětí (v rovině účinného průřezu) rovnoběžné s osou svaru,
	f_u		mez pevnosti,
	γ_{M2}		dílčí součinitel materiálu,
	β_w		korelační součinitel (viz tab. 4.1 ČSN EN 1993-1-8).

5.4.8.1 Krční svary pod horní pásnicí

Posouzení se provádí v průřezu u podpory, kde působí největší posouvající síla. Podporový průřez je namáhán největší posouvající silou V_{Ed} , místním tlakem F_{Ed} a krouticím momentem T_{Ed} , který je způsobený příčnou excentricitou kolového zatížení.

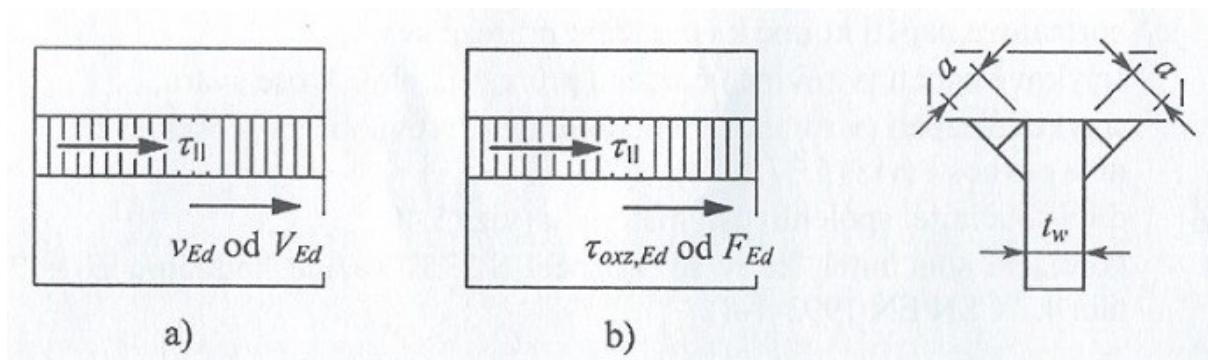
Posouvající síla V_{Ed} vyvozuje v krčních svarech vodorovné napětí neboli smykové napětí rovnoběžné s osou svaru τ_{\parallel} (obr. 33a), jež lze odvodit ze smykového toku v_{Ed} (smyková síla na 1mm délky). Smykový tok lze určit podle vztahu (viz odst. 9.3.5(1) ČSN EN 1993-1-5)

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{h_w}. \quad (115)$$

Vodorovné napětí ve svarech lze poté určit podle vztahu

$$\tau_{\parallel} = \frac{v_{Ed}}{2 a}. \quad (116)$$

kde a je účinná tloušťka svaru.



Obr. 33 Vodorovná napětí ve svarech [18]

Kolové zatížení F_{Ed} působící na horní pásnici vyvozuje v krčních svarech

- svislé napětí $\sigma_{vert,F}$, jsoucí výslednicí $\sigma_{\perp,F}$ a $\tau_{\perp,F}$, jež lze odvodit z lokálního tlakového napětí $\sigma_{oz,Ed}$ (52), (obr. 34a),
- vodorovné smykové napětí rovnoběžné s osou svaru $\tau_{\parallel,F}$, jež lze odvodit z lokálního smykového napětí ve stojině $\tau_{oxz,Ed}$ (53), (obr. 33b).

Při výpočtu svislého napětí ve svarech od kolového zatížení předpokládáme, že stojina je hoblovaná a těsně přilehá k pásnici, takže k tloušťce svaru je možno započítat i tloušťku stojiny. Napětí lze určit ze vztahu

$$\sigma_{vert,F} = \sigma_{oz,Ed} \frac{t_w}{2a + t_w}. \quad (117)$$

Napětí σ_{vert} rozložíme do složek kolmé a rovnoběžné s rovinou účinného svaru

$$\sigma_{\perp,F} = \tau_{\perp,F} = \frac{\sigma_{vert,F}}{2}. \quad (118)$$

Vodorovné napětí ve svarech od kolového zatížení lze určit podle vztahu

$$\tau_{\parallel,F} = \tau_{oxz,Ed} \frac{t_w}{a}. \quad (119)$$

Krouticí moment T_{Ed} způsobený příčnou excentricitou kolového zatížení vyvozuje v krčních svarech svislé napětí $\sigma_{vert,T}$, jsoucí výslednicí složek $\sigma_{\perp,T}$ a $\tau_{\perp,T}$, jež lze odvodit z lokálního ohybového napětí ve stojině $\sigma_{T,Ed}$ (54), (obr. 34b). Napětí lze určit podle vztahu (viz kap. 5.1.7 [18])

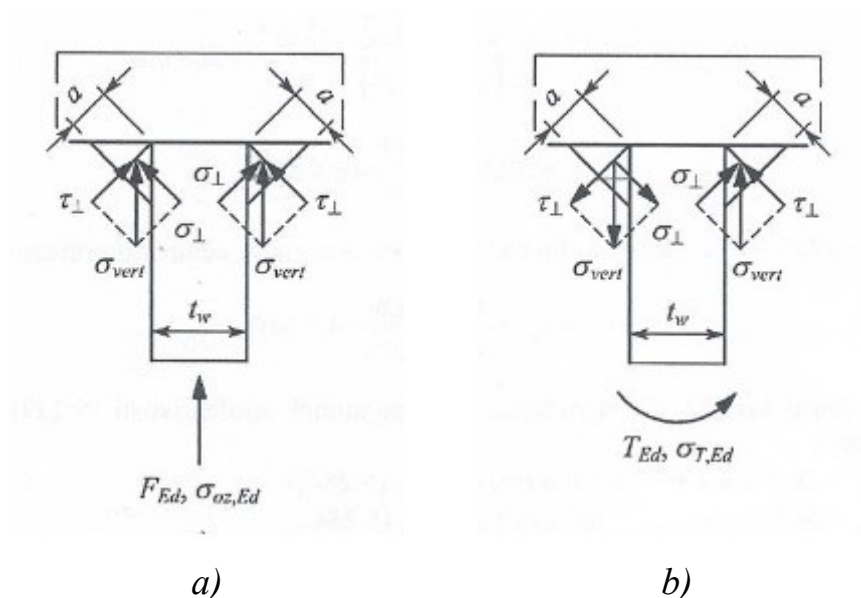
$$\sigma_{vert,T} = \sigma_{T,Ed} \frac{1,0 \cdot t_w^2}{6W}, \quad (120)$$

kde W je průřezový modul oboustranného koutového svaru včetně stojiny, který vypočteme podle vztahu (viz kap. 5.1.7 [18])

$$W = 1,0 \frac{\bar{2}(t_w + \bar{2}a)^3 - (\bar{2} - 1)t_w^3}{6(t_w + \bar{2}a)}. \quad (121)$$

Napětí σ_{vert} rozložíme do složek kolmé a rovnoběžné s rovinou účinného svaru

$$\sigma_{\perp,T} = \tau_{\perp,T} = \frac{\sigma_{vert,T}}{2}. \quad (122)$$



Obr. 34 Svislá napětí v krčních koutových svarech [18]

Únosnost svaru ověříme podle podmínek spolehlivosti (113), (114), do nichž dosadíme

- napětí $\sigma_{\perp} = \sigma_{\perp,F} + \sigma_{\perp,T}$ (viz (118), (122)),
- napětí $\tau_{\perp} = \tau_{\perp,F} + \tau_{\perp,T}$ (viz (118), (122)),
- napětí $\tau_{\parallel} = \tau_{\parallel} + \tau_{\parallel,F}$ (viz (116), (119)).

Při návrhu je nutné nechat dostatečnou rezervu oproti dosažení návrhové únosnosti, neboť pro jejich dimenzování bude rozhodovat únavové namáhání (viz kapitola 5.6).

5.4.8.2 Krční svary nad spodní pásnicí

Pro posouzení svaru připojujících spodní pásnici a stojinu rozhoduje opět kombinace zatížení zahrnující stále zatížení a užité zatížení jeřáby (skupina zatížení 1). Posouzení se provádí v průřezu u podpory, kde působí největší posouvající síla V_{Ed} . Krční svary jsou dimenzovány na účinky této síly podle podmínek spolehlivosti (113) a (114).

5.5 Mezní stavy použitelnosti

Mezní stavy použitelnosti je nutné ověřit s ohledem na

- svislý průhyb nosníku, aby se vyloučily nadměrné vibrace způsobené provozem jeřábu a aby se zabránilo nadměrnému sklonu dráhy a nadměrnému naklonění jeřábu.
- štíhlost stojiny, aby se vyloučilo její viditelné boulení nebo dýchání
- štíhlost spodní pásnice, aby se vyloučilo její znatelné chvění v důsledku provozu jeřábu.

5.5.1 Svislé průhyby nosníků

Je potřeba prokázat, že mezní hodnota průhybu nosníku jeřábové dráhy od extrémního zatížení nepřekročí limitní hodnotu. (viz odst. 7.3(1) ČSN EN 1993-6).

$$\delta_{Ed} \leq \delta_{Cd}, \quad (123)$$

kde δ_{Ed} je pružné přetvoření od charakteristické kombinace zatížení (bez dynamických součinitelů),
 δ_{Cd} doporučená mezní hodnota přetvoření, jakožto návrhové kritérium použitelnosti (viz odst. 6.5.1(1) ČSN EN 1990).

Návrhovými kritérii použitelnosti jsou (viz tab. 7.2 ČSN EN 1993-6)

- Pro zabránění nadměrného sklonu JD je mezní hodnota svislého průhybu

$$\delta_{z,Cd} \leq \frac{l}{600}, \quad (124)$$

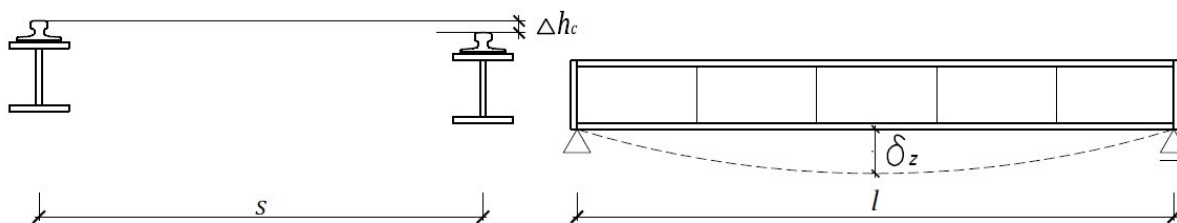
- Pro vyloučení nadměrných vibrací nosníku jeřábové dráhy je mezní hodnota svislého průhybu (obr. 35)

$$\delta_{z,Cd} \leq 25 \text{ mm}, \quad (125)$$

- Pro zamezení nadměrného naklonění jeřábu je mezní hodnota rozdílu svislých průhybů dvou nosníků tvořící jeřábovou dráhu (obr. 35)

$$\Delta h_{c,Cd} = \frac{s}{600}, \quad (126)$$

kde l je délka nosníku jeřábové dráhy,
 s rozpětí jeřábu (neboli rozchod jeřábu).



Obr. 35 Mezní hodnoty průhybů

Celkový svislý průhyb jeřábového nosníku získáme superpozicí průhybů od stálého zatížení a svislých tlaků kol jeřábu. Případně odečteme od celkového průhybu výrobní nadvýšení jeřábového nosníku. Při tomto posouzení vycházíme z charakteristických tj. normových hodnot zatížení

$$\delta_z = \delta_F + \delta_G - \delta_0. \quad (127)$$

Charakteristické hodnoty statických složek maximálních svislých tlaků kol na jedné větvi jeřábové dráhy získáme tedy podle vztahu

$$F = Q_{C,r,max} + Q_{H,r,max}, \quad (128)$$

kde $Q_{C,r,max}$ je maximální svislé zatížení od kola jeřábu způsobené jeho vlastní tíhou (viz),

$Q_{H,r,max}$ maximální svislé zatížení od kola jeřábu způsobené zatížením kladkostroje (viz).

Pro výpočet rozdílu svislých průhybů dvou nosníků JD je nutné stanovit hodnotu průhybu na její méně zatížené větvi. Charakteristické hodnoty statických složek minimálních svislých tlaků kol určíme ze vztahu

$$F = Q_{C,r,(max)} + Q_{H,r,(max)}, \quad (129)$$

kde $Q_{C,r,(max)}$ je doprovodné (minimální) svislé zatížení od kola jeřábu způsobené jeho vlastní tíhou (viz),

$Q_{H,r,(max)}$ doprovodné svislé zatížení od kola jeřábu způsobené zatížením kladkostroje (viz).

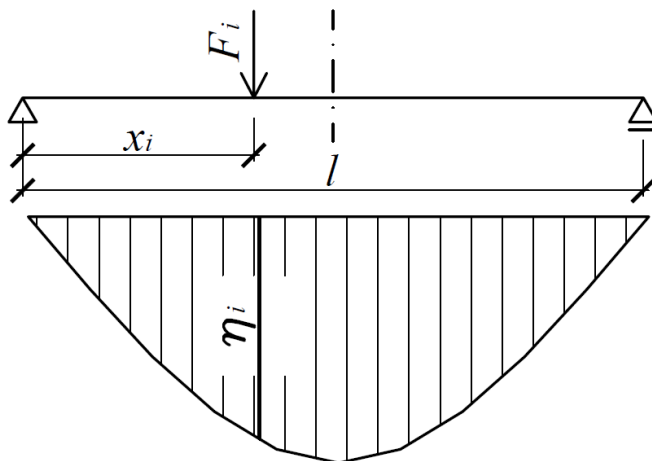
Pro výpočet průhybu byla na základě podkladů ze skript [14] odvozena rovnice příčinkové čáry průhybu uprostřed nosníku (obr. 36). V místě působení i -tého břemena ve vzdálenosti x vypočteme hodnotu pořadnice příčinkové čáry podle vzorce

pro $0 \leq x \leq l/2$

$$\eta_{i(x \leq l/2)} = \frac{1}{6} \cdot l^3 \cdot \frac{x}{l} \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{x}{l}^2 - 0,5^2\right) / EI, \quad (130)$$

pro $l/2 \leq x \leq l$

$$\eta_{i(l/2 \leq x \leq l)} = \frac{\frac{1}{6} \cdot l^3 \cdot \left(l - \frac{x}{l}\right) \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \left(l - \frac{x}{l}\right)^2 - 0,5^2\right)}{EI}. \quad (131)$$



Obr. 36 příčinková čára průhybu uprostřed rozpětí prostého nosníku

Průhyb uprostřed rozpětí vyvolaný svislými tlaky kol se pak rovná

$$\delta_F = \sum_{i=1}^n F_i \cdot \eta_i. \quad (132)$$

V programu byla vytvořena procedura (viz příloha B), pomocí níž je simulován pohyb břemen po nosníku JD. Pro každý krok je počítán průhyb podle (130), (131). Hodnota největšího průhybu je uložena a vytisknuta do buňky. Procedura je použita pro obě větve jeřabové dráhy (maximálně a minimálně zatíženou). Tyto hodnoty jsou použity pro posouzení MSP podle podmínky (126).

Průhyb od stálého zatížení uprostřed nosníku stanovíme podle vzorce

$$\delta_G = \frac{5}{384} \frac{gL^4}{EI}, \quad (133)$$

kde g je charakteristická hodnota stálého zatížení,
 l rozpětí nosníku jeřabové dráhy,
 E modul pružnosti v tahu a tlaku,
 I moment setrvačnosti.

5.5.2 Štíhlost stojiny

Aby se vyloučilo nadměrné dýchání stojiny, které může vést k únavě v krčních svarech, má být splněna podmínka mezní štíhlosti (viz odst. 7.6(2) ČSN EN 1993-6). V panelech stojin bez podélných výztuh lze nadměrné dýchání stojin zanedbat, je-li

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 12,0, \quad (134)$$

kde h_w je výška stojiny,
 t_w tloušťka stojiny.

5.5.3 Štíhlost spodní pásnice

Aby se vyloučila možnost znatelného chvění spodní pásnice nosníku JD v důsledku provozu jeřábu, má být štíhlostní poměr spodní pásnice menší nebo roven 250 (viz odst. 7.4(3) ČSN EN 1993-6). Štíhlostní poměr pásnice

$$\frac{L_t}{i_{t,z}} \leq 250, \quad (135)$$

kde L_t je vzdálenost příčných podpor spodní pásnice,
 $i_{t,z}$ poloměr setrvačnosti spodní pásnice.

5.6 Únava

Účelem navrhování konstrukcí na mezní stavy únosnosti FAT (viz odst. 6.4.1(1) ČSN EN 1990) je zajistit s přijatelnou pravděpodobností, že po dobu návrhové životnosti se konstrukce neporuší v důsledku únavy. Návrhová životnost jeřábové dráhy je s ohledem na posouzení na únavu 25 let (viz odst. 2.1.3.2(1) ČSN EN 1993-6). Posouzení na únavu (viz kap. 9 ČSN EN 1993-6) se musí provést u dílců a spojů vystavených proměnlivému namáhání. Při návrhu je třeba dbát na to, aby únavová pevnost byla dostatečně vysoká. Za tímto účelem se navrhují detaily, jež způsobují malou koncentraci napětí (tedy spadají do vysoké kategorie detailu). Rozhodujícími činiteli únavové pevnosti jsou rozkmit napětí, počet zatěžovacích cyklů, spektrum zatížení a uspořádání detailů.

Posouzení konstrukčního detailu na únavu se provede srovnáním hodnoty celkového poškození únavou D_d , vyvozeného návrhovým spektrem zatížením, s přípustnou mezní hodnotou poškození únavou $D_L=1,0$. Podmínka spolehlivosti je (viz rovnice (A.2) ČSN EN 1993-1-9).

$$D_d \leq 1,0. \quad (136)$$

K ověření únavové pevnosti založeném na kumulaci poškození se používá ekvivalentní návrhové spektrum zatížení o konstantním rozkmitu Q_e s počtem cyklu $N_c = 2 \cdot 10^6$, které způsobuje stejné únavové poškození jako skutečné spektrum zatížení (viz odst. A.5(2) ČSN EN 1993-1-9 a odst. 9.3.2(1) ČSN EN 1993-6). Ekvivalentní únavové poškození Q_e (viz) tak vyvolá v konstrukci ekvivalentní rozkmit y jmenovitých napětí $\Delta\sigma_{E2}$ a $\Delta\tau_{E2}$ (viz kap. 9.3.2 ČSN EN 1993-6).

Poznámka – Výpočet únavového zatížení Q_e proveden podle zjednodušené metody uvedené v ČSN EN 1991-3, kap. 2.12.1(4)1, neboť se předpokládá, že v době návrhu nebude dostatečné množství informací o provozu jeřábu. Počet cyklů $N_c = 2 \cdot 10^6$ odpovídá cca 200 pojezdů za den za 25let.

Únavové poškození D_σ způsobené rozkmitem normálového napětí $\Delta\sigma_{E2}$ se vypočte podle vztahu (viz rovnice (8.3) ČSN EN 1993-1-9)

$$D_\sigma = \gamma_{fF} \cdot \Delta\sigma_{E2} \frac{\gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_C}^3. \quad (137)$$

Poznámka – Využití detailu lze získat jako 3. odmocninu z celkové hodnoty poškození, tj. $\sqrt[3]{D_\sigma}$.

Únavové poškození D_τ způsobené rozkmitem smykového napětí $\Delta\tau_{E2}$ se vypočte podle vztahu (viz rovnice (8.3) ČSN EN 1993-1-9)

$$D_\tau = \gamma_{fF} \cdot \Delta\tau_{E2} \frac{\gamma_{Mf}}{\Delta\tau_C}^5. \quad (138)$$

Poznámka – Využití detailu lze získat jako 5. odmocninu z celkové hodnoty poškození, tj. $\sqrt[5]{D_\tau}$.

Je-li základní materiál náchylný k únavovému poškození způsobenému současným působením rozkmitů normálového a smykového napětí ($\Delta\sigma_{E2}$, resp. $\Delta\tau_{E2}$), uváží se jejich společný účinek jako lineární kumulace únavových poškození D_σ a D_τ (viz odst. 5(5) a 8(3) ČSN EN 1993-1-9). Celkové poškození únavou je v takovém případě

$$D_D = D_\sigma + D_\tau. \quad (139)$$

Pro ověření únavové pevnosti hlavního napětí, působícím v daném detailu se vypočte únavové poškození D_σ podle (137), kde se dosadí místo rozkmitu normálového $\Delta\sigma_{E2}$ napětí rozkmit hlavního napětí

$$\Delta\sigma_{vert,E2} = \frac{1}{2} \Delta\sigma_{E2} + \sqrt{\Delta\sigma_{E2}^2 + \Delta\tau_{E2}^2}, \quad (140)$$

Celkové poškození únavou je v takovém případě

$$D_D = D_\sigma. \quad (141)$$

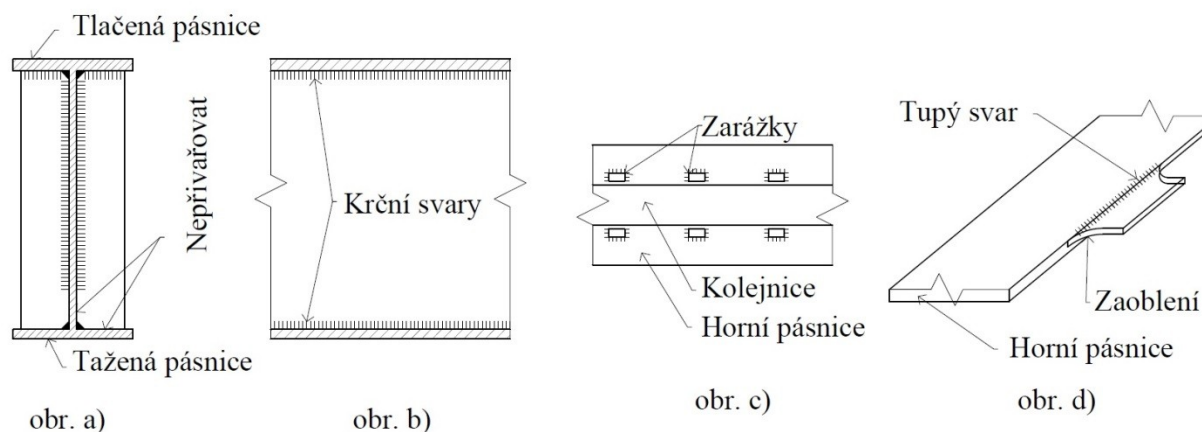
Při posouzeních koutových svarů na únavu se uvažují pouze rozkmity normálového napětí ve směru kolmém k ose svaru $\Delta\sigma_{\text{vert},E2}$ a smykové napětí ve směru rovnoběžném s osou svaru $\Delta\tau_{\parallel,E2}$, jejichž účinky se ověřují nezávisle na sobě (viz odst. 5(6) ČSN EN 1993-1-9). Celkové poškození únavou je v takovém případě

$$D_D = \max D_\sigma, D_\tau . \quad (142)$$

5.6.1 Únavová pevnost

Materiál hlavního nosníku JD může být ovlivněn těmito vruby

- v místech připojení příčných výztuh ke stojině a tlačené pásnici (obr. 35a),
- v místě průběžného spojení stojiny a pásnice (krční svary, obr. 35b),
- v místě přivaření zarážek k horní pásnici zajišťující polohu kolejnice (obr. 35c),
- v místech připojení styčnickových plechů vodorovného výztužného nosníku k horní pásnici (obr. 35d).



Obr. 37 Detaily náchylné k poškození únavou

Zařazení detailu do příslušné kategorie se provádí podle tabulek 8.1-8.10 v ČSN EN 1993-1-9. Pro usnadnění návrhu byla vytvořena tabulka, ve které jsou stručně popsány jednotlivé vruby a tabulky, ve kterých lze vyčíst požadovaná únavová pevnost (tabulka 7).

Tabulka 7 Kategorie detailů pro posouzení na únavu

Popis detailu	Obrázek	ČSN EN 1993-1-9	Kategorie
Základní materiál horní pásnice ovlivněný přeplatovaným připojením zarážek koutovými svary	obr. c	tabulka 8.5	D_{Sc}^1
Základní materiál horní pásnice ovlivněný v místě připojení styčnickového plechu	obr. d	tabulka 8.4	D_{Sc}^1
Základní materiál horní pásnice ovlivněný přivařením příčných výztuh	obr. a	tabulka 8.4	D_{Sc}^1

Základní materiál horní pásnice nebo stojiny ovlivněný průběžnými koutovými svary	obr. b	tabulka 8.2	D_{Sc}^1
Průběžné krční koutové svary spojující horní pásnici a stojinu, přenášející smykový tok	obr. b	tabulka 8.5	D_{tII}^2
Průběžné krční koutové svary spojující horní pásnici a stojinu, přenášející svislé tlakové napětí od tlaků kol	obr. b	tabulka 8.10	$D_{S_{vert}}^3$
Základní materiál stojiny ovlivněný přivařením příčných výztuh	obr. a	tabulka 8.4	D_{Seq}^4
Průběžné krční koutové svary spojující spodní pásnici a stojinu, přenášející smykový tok	obr. b	tabulka 8.10	D_{tII}^2
Základní materiál spodní pásnice nebo stojiny ovlivněný průběžnými krčními svary	obr. b	tabulka 8.2	D_{Sc}^1
¹⁾ kategorie detailu pro rozkmit normálového napětí D_{Sc}			
²⁾ kategorie detailu pro rozkmit smykového napětí ve směru rovnoběžném s osou svaru D_{tII}			
³⁾ kategorie detailu pro rozkmit normálového napětí ve směru kolmém k ose svaru $D_{S_{vert}}$			
⁴⁾ kategorie detailu pro rozkmit hlavního napětí D_{Seq}			

Poznámka – Kategorie detailu je číselné označení určitého konstrukčního detailu, které vyjadřuje referenční únavovou pevnost $\Delta\sigma_c$ nebo $\Delta\tau_c$ v MPa při 2 milionech cyklů (viz odst. 7.1(1) ČSN EN 1993-1-9).

Dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti γ_{Mf} se volí podle důsledku porušení konstrukce a použité metody hodnocení (viz odst. 3(4) ČSN EN 1993-1-9). Doporučené hodnoty dílčích součinitelů jsou uvedeny v tabulce 3.1 v ČSN EN 1993-1-9.

5.6.2 Posouzení

Pomocí vytvořeného programu lze provést tyto posouzení

- posouzení pásnic pro rozkmit normálového napětí a ohybového momentu,
- posouzení stojiny pro rozkmit hlavního napětí od ohybového momentu a posouvající síly,
- posouzení krčních svarů pro rozkmit smykového napětí od posouvající síly,
- posouzení krčních svarů pro rozkmit svislého tlakového napětí od tlaků kol.

5.6.3 Posouzení pásnic pro rozkmit normálového napětí od ohybového momentu

Rozhodující detaily pro posouzení na únavu jsou ty, které spadají do nejnižší kategorie detailu. Pro jejich posouzení je použito únavové zatížení, které vyvolá na nosníku ekvivalentní rozkmit normálového napětí, jež lze stanovit

1. v horní pásnici ze vztahu

$$\Delta\sigma_{E2} = \frac{\Delta M_{E2}}{W_{el,y,1}}, \quad (143)$$

2. v spodní pásnici ze vztahu

$$\Delta\sigma_{E2} = \frac{\Delta M_{E2}}{W_{el,y,2}}, \quad (144)$$

kde ΔM_{E2} je ekvivalentní rozkmit ohybového momentu,
 $W_{el,y,1}$ průřezový modul pro horní vlákno nosníku,
 $W_{el,y,2}$ průřezový modul pro spodní vlákno nosníku.

Program byl vytvořen tak, že počítá s možností jednoho či dvou jeřábů. Proto počítá rozkmit napětí pro jeden, popřípadě dva jeřáby, a také uvažuje s možností jejich spolupůsobení. Výpočet únavového poškození D_σ (podle (137)) od účinků prvního jeřábu, druhého jeřábu a spolupůsobících jeřábů dosadí do podmínky (viz odst. 9.4.2(1) až 9.4.2(3) ČSN EN 1993-6)

$$D_\sigma = D_{\sigma 1} + D_{\sigma 2} + D_{\sigma, dup} \leq 1, \quad (145)$$

kde $D_{\sigma 1}$ je únavové poškození způsobené rozkmity napětí od prvního jeřábu,
 $D_{\sigma 2}$ únavové poškození způsobené rozkmity napětí od druhého jeřábu,
 $D_{\sigma, dup}$ únavové poškození způsobené rozkmity napětí od obou jeřábů.

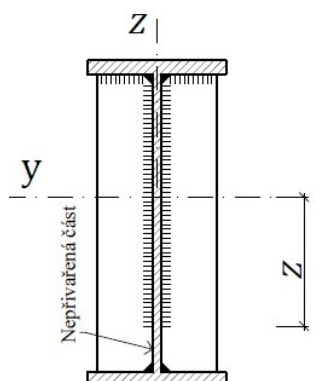
Program provede posouzení podle podmínky (145) pro horní i spodní vlákno.

5.6.4 Posouzení stojiny pro rozkmit hlavního napětí od ohybového momentu a posouvající síly

Rozhodujícím detailem pro posouzení na únavu je ukončení svarového přípoje příčné výztuhy nad spodní pásnicí. Pro posouzení tohoto detailu se použije ekvivalentní únavové zatížení pro poškození způsobené rozkmitem normálového napětí. S ohledem na minimalizaci vrubových účinků bývá výztuha ve spodní části jen zalícovaná, ale nepřivařená. Ekvivalentní konstantní rozkmit jmenovitého normálového napětí v detailu na stojině je určen dle vztahu

$$\Delta\sigma_{E2} = \frac{\Delta M_{E2}}{I_y} z, \quad (146)$$

kde ΔM_{E2} je ekvivalentní rozkmit ohybového momentu,
 I_y moment setrvačnosti hlavního průřezu,
 z z-ová souřadnice posuzovaného průřezu (obr. 38).



Obr. 38 Nepřivařená část příčné výztuhy

Ekvivalentní konstantní rozkmit jmenovitého smykového napětí v detailu na stojině je určen dle vztahu

$$\Delta\tau_{E2} = \frac{\Delta V_{E2} S_y}{I_y t_w}, \quad (147)$$

kde ΔV_{E2} je ekvivalentní rozkmit posouvající síly,
 t_w tloušťka stojiny,
 S_y statický moment části průřezu pod posuzovaným detailem
 k těžišťové ose y , jež se vypočte ze vztahu [18]

$$S_y = \frac{1}{2} \cdot b \cdot (e_2^2 - h_{w2}^2 \cdot t_w (h_{w1}^2 - z^2)), \quad (148)$$

kde b je šířka spodní pásnice,
 e_2 vzdálenost spodního krajního vlákna nosníku od těžišťové osy y ,
 h_{w2} výška tažené části stojiny.

Ze známých hodnot rozkmitů normálového a smykového napětí určíme podle (140) rozkmit hlavního napětí $\Delta\sigma_{vert,E2}$.

Výpočet únavového poškození stojiny D_σ v oblasti ukončení svarového přípoje příčné výztuhy provedeme podle (137). Vypočtené únavové poškození posoudíme podle podmínek (136), (145).

5.6.5 Posouzení krčních svarů pro rozkmit smykového napětí od posouvající síly

Krční svary pod horní pásnicí i nad spodní pásnicí, jež přenášejí smykový tok od posouvající síly, vykazují referenční únavovou pevnost $\Delta\tau_c$ (viz tabulka 7). Pro posouzení svarů se použije únavové zatížení pro poškození způsobené rozkmitem smykového napětí. Ekvivalentní konstantní rozkmit jmenovitého smykového napětí lze stanovit

3. v krčních svarech pod horní pásnicí ze vztahu

$$\Delta\tau_{\parallel,E2} = \frac{\Delta V_{E2} S_{f1,y}}{2 I_y a}, \quad (149)$$

4. v krčních svarech nad spodní pásnicí ze vztahu

$$\Delta\tau_{\parallel,E2} = \frac{\Delta V_{E2} S_{f2,y}}{2 I_y a}, \quad (150)$$

kde ΔV_{E2} je ekvivalentní rozkmit posouvající síly,
 a účinná tloušťka svaru,
 I_y moment setrvačnosti průřezu k těžišťové ose y ,
 $S_{f1,y}, S_{f2,y}$ statické momenty horní a spodní pásnice k těžišťové ose y , které lze určit podle vztahu [18]

$$S_{f1,y} = \frac{1}{2} b t_{f1} 2e_1 - t_{f1}^2, \quad (151)$$

$$S_{f2,y} = \frac{1}{2} b t_{f2} 2e_2 - t_{f2}^2, \quad (152)$$

kde b je šířka pásnic,
 t_{f1}, t_{f2} tloušťky horní a spodní pásnice,
 e_1, e_2 vzdálenosti horního krajního a spodního krajního vlákna od těžišťové osy y (obr. 23).

Výpočet únavového poškození D_τ v oblasti krčních svarů provedeme podle (138). Vypočtené únavové poškození posoudíme podle podmínek (136),(145).

5.6.6 Posouzení krčních svarů pro rozkmit svislého tlakového napětí od tlaků kol

Krční koutové svary pod horní pásnicí, jež přenášejí svislé tlakové napětí od kol jeřábu, vykazují referenční únavovou pevnost $\Delta\sigma_c$ (viz tabulka 7). Pro posouzení se použije ekvivalentní únavové zatížení pro poškození způsobené rozkmitem normálového napětí.

Výpočtu rozkmitů napětí v krčních svarech předchází stanovení rozkmitu napětí ve stojině (viz odst. 9.3.3(1) ČSN EN 1993-6). Ekvivalentní rozkmit lokálního svislého tlakového napětí ve stojině lze stanovit se vztahu

$$\Delta\sigma_{oz,E2} = \frac{\Delta F_{E2}}{l_{eff} \cdot t_w}, \quad (153)$$

kde ΔF_{E2} je ekvivalentní rozkmit místní příčné síly,
 t_w tloušťka stojiny,
 l_{eff} účinná roznášecí šířka.

Pro výpočet účinné roznášecí délky podle (tabulka 5), se použijí momenty setrvačnosti kolejnice I_r a horní pásnice $I_{f1,eff}$ zahrnující opotřebení kolejnice rovné 12,5% tloušťky pojížděné části kolejnice (viz tab. 5.1 a odst. 5.6.2(3) ČSN EN 1993-6).

Moment setrvačnosti horní pásnice $I_{f1,eff}$ se určí podle (56), kde se použije účinná šířka pásnice

$$b_{eff} = b_{fr} + 0,875 h_r + t_f, \quad \text{ale} \quad b_{eff} \leq b \quad (154)$$

Z rozkmitů napětí ve stojině odvodíme příslušné rozkmity napětí ve svarech podle vztahu

$$\Delta\sigma_{vert,E2,F} = \Delta\sigma_{oz,E2} \frac{t_w}{2a + t_w}, \quad (155)$$

kde $\Delta\sigma_{oz,E2}$ je ekvivalentní rozkmit lokálního svislého tlakového napětí ve stojině,
 t_w tloušťka stojiny,
 a účinná tloušťka svaru.

Místní příčná síla, působící na excentricitě e podle (58), zahrnuje do únavového namáhání také ekvivalentní rozkmit krouticího momentu způsobeného touto excentricitou, který je

$$\Delta T_{E2} = \Delta F_{E2} e. \quad (156)$$

Ekvivalentní rozkmit lokálního ohybového napětí ve stojině lze pak určit ze vztahu

$$\Delta\sigma_{T,E2} = \frac{6 \cdot \Delta T_{E2}}{a \cdot t_w^2} \cdot \eta \cdot tgh(\eta), \quad (157)$$

kde ΔT_{E2} je ekvivalentní rozkmit krouticího momentu,
 a vzdálenost příčných výztuh stojiny,
 η parametr podle (viz obr. 22).

Z rozkmitu lokálního ohybového napětí ve stojině $\sigma_{T,Ed}$ lze určit svislé tlakové napětí ve svarech podle vztahu

$$\Delta\sigma_{vert,E2,T} = \Delta\sigma_{T,E2} \frac{1,0 \cdot t_w^2}{6W}, \quad (158)$$

kde $\Delta\sigma_{vert,E2,T}$ je ekvivalentní rozkmit lokálního ohybového napětí ve stojině,
 W průřezový modul svarů i se stojinou podle (121).

Rozkmity napětí $\Delta\sigma_{vert,E2,F}$ a $\Delta\sigma_{vert,E2,T}$ jsou složkami výsledných rozkmitů napětí, které získáme jejich superpozicí, tj.

$$\Delta\sigma_{vert,E2} = \Delta\sigma_{vert,E2,F} + \Delta\sigma_{vert,E2,T}. \quad (159)$$

Rozkmitý napětí $\Delta\sigma_{vert,E2}$ dosadíme do vzorce (137) pro výpočet únavového poškození krčních svarů připojující horní pásnici D_σ . Únavovou pevnost ověříme podle podmínek spolehlivosti (136),(145).

6 Program vytvořený v MS Excel

Program vytvořený v MS Excel slouží k návrhu a posouzení hlavního nosníku jeřábové dráhy. Smyslem programu je zjednodušit a zefektivnit tento proces. Pomocí něj lze jednoduše vypočítat zatížení jeřábové dráhy, určit vnitřní síly, navrhnout kolejnici a hlavní nosník jeřábové dráhy a provést příslušná posouzení podle norem. Celá práce v MS Excel obsahuje 11 listů. Sedm slouží pro návrh a posouzení, ve zbylých jsou vytvořeny knihovny, ze kterých jsou načítány potřebné hodnoty. Uživatel zadává potřebné parametry do žlutě označených buněk, nebo do formulářů. Složitější funkce a procedury byly naprogramovány v jazyku VBA do modulů. Program obsahuje celkem 17 formulářů a 38 modulů. Některé z nich jsou uvedeny v příloze B.

Výstup z programu pro konkrétní zadání návrhu a posouzení JD zatížené dvěma jeřáby je uveden v příloze A. Příklad je porovnán a ověřen s hodnotami ručního výpočtu uvedeným v literatuře [18] pro stejné zadání řešení jeřábové dráhy, čímž je ověřena správná funkčnost vytvořené aplikace.

6.1 Základní parametry jeřábů + načtení kolejnice

Základní parametry jeřábů udává výrobce ve své dokumentaci. Všechny parametry potřebné pro výpočet jeřábové dráhy uživatel vyplní do připravených tabulek.

6.1.1 Parametry jeřábů

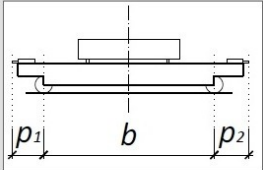
Geometrie

Uživatel si zvolí, zda je posuzovaný prostý nosník JD namáhán jedním či dvěma jeřáby. Dále zadá délku JD. Do připraveného formuláře vyplní základní geometrii jeřábu/ů (viz obr. 39).

1.1 Parametry jeřábů				
Tabulka 1.1.a- Geometrie				
Počet jeřábů na jedné JD	$n_{\text{jeřab}}$	2	[-]	Načtení geometrie jeřábu
Rozpětí jeřábové dráhy (JD)	L	12	[m]	

Geometrie- Boční pohled

1. Jeřáb



[mm]

[mm]

[mm] Zadat hodnotu

p_1, p_2 vodorovná vzdálenost osy kola od osy nárazníku

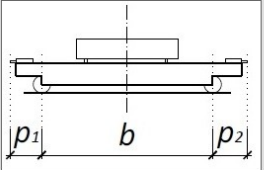
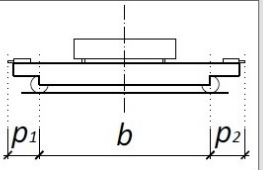
b rozvor kol

Načíst hodnoty

Geometrie- Boční pohled

1. Jeřáb

2. Jeřáb

[mm]

[mm]

[mm]

[mm]

[mm] Zadat hodnotu

[mm]

p_1, p_2 vodorovná vzdálenost osy kola od osy nárazníku

b rozvor kol

Načíst hodnoty

Obr. 39 Geometrie jeřábu

Základní parametry jeřábu

Doporučené kategorie zatížení jsou uvedeny v příloze B. 1 normy ČSN EN 1993-6. Uživatel má možnost snadno nahlédnout do této přílohy, když myší označí ikonu v tabulce (obr. 40).

Tabulka 1.1.b- Základní parametry					
Základní parametry jeřábu	Ozn.	1. Jeřáb	Ozn.	2. Jeřáb	
Počet dvojic kol	n	2	[-]	2	[-]
Rozpětí jeřábu	s	22,5	[m]	22,5	[m]
Rozvor kol	b	5,6	[m]	4,5	[m]
Vodorocný dojezd háku	c	2,25	[m]	2,05	[m]
Tíha břemene	Q_h	500	[kN]	320	[kN]
Tíha kočky	Q_t	113	[kN]	84	[kN]
Tíha jeřábu s kočkou	Q_c	476	[kN]	349	[kN]
Rychlost zdvihu kladkostroje	v_h	0,083	[m·s ⁻¹]	0,133	[m·s ⁻¹]
Rychlost pojezdu jeřábu	v_c	1,333	[m·s ⁻¹]	1,333	[m·s ⁻¹]
Zdvihová třída		HC2		HC2	
Kategorie únavových účinků		S5		S5	

Obr. 40: Základní parametry jeřábu

Konstrukční parametry jeřábu

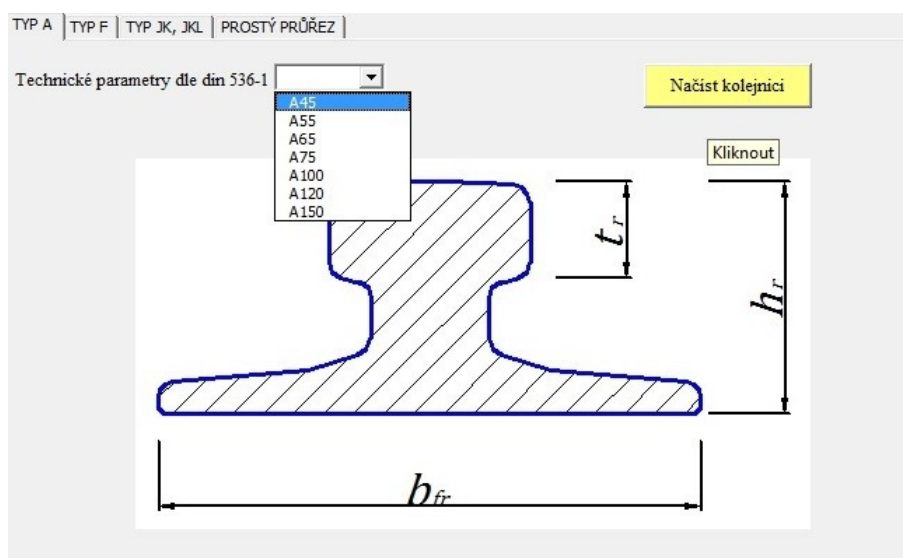
Dále je nezbytné vyplnit tabulku (viz obr. 41). Ten, kdo se souborem pracuje, má na výběr ze dvou konstrukčních charakteristik pro daný jeřáb. Tyto parametry budou následně použity pro výpočet zatížení od jeřábů (viz kap. 3.2.1).

Tabulka 1.1.c- Konstrukční parametry		
Konstrukční parametry jeřábu	1. Jeřáb	2. Jeřáb
Pohon hnacích kol	separátní ▼	centrální ▼
Počet pohonů hnacích kol m_w	2	2
Kombinace dvojic kol	nezávislá kola (I) ▼	spřažená kola (C) ▼
Uložení kol vzhledem k bočním pohybům	pevné/pevné (FF) ▼	pevné/posuvné (FM) ▼
Vedení jeřábu na jeřábové dráze	oboustranné nákolky ▼	oddělené vodící prostř. ▼

Obr. 41 Konstrukční parametry jeřábu

6.1.2 Parametry kolejnice

Po otevření formuláře vybere uživatel ze seznamu kolejnic (viz kap. 2.4) požadovaný profil a potvrdí tlačítkem “Načíst kolejnici” (obr. 42).



Obr. 42 Formulář pro načtení kolejnice

Po načtení parametrů kolejnice je dále potřeba určit způsob jejího uložení k pásnici hlavního nosníku JD (kapitola 2.4), (obr. 32).

Tabulka 1.2- Kolejnice			
Parametry kolejnice	Hodnota		Poznámka
Průřez jeřábové kolejnice	Prostý průřez		(Prostý průřez)
Výška pojižděné části kolejnice	t_r	100 [mm]	
Výška kolejnice	h_r	100 [mm]	
Šířka kolejnice (hlava)	b_{fr}	100 [mm]	
Šířka kolejnice (pata)	b_{fr}	100 [mm]	
Moment setrvačnosti (neopotřeбенá)	$I_{r,100}$	8,33E+06 [mm ⁴]	
Moment setrvačnosti (opotřeбенá 12,5%)	$I_{r,87,5}$	5,58E+06 [mm ⁴]	(opotřeбенá pojižděná část kolejnice- t_r)
Moment setrvačnosti (opotřeбенá 25%)	$I_{r,75}$	3,52E+06 [mm ⁴]	
Hmotnost kolejnice	m	78,5 [kg/m]	
Způsob uložení kolejnice k nosníku JD	Případ uložení (c) ▼		Případy uložení kolejnice

Obr. 43 Parametry kolejnice potřebné pro výpočet

6.2 Zatížení hlavního nosníku JD

Výpočty zatížení jeřábové dráhy byly stanoveny podle zásad ČSN EN 1990 [4], ČSN EN 1991-1-1 [5] a ČSN EN 1991-3 [6].

6.2.1 Stálé zatížení

Po otevření listu “Zatížení” uživatel vyplní žlutě označené buňky. Tyto hodnoty bude program používat pro výpočet vnitřních sil na nosníku JD (obr. 44).

Tabulka 2.1- Stálé zatížení			
Stálé zatížení	g_k [kNm ⁻¹]	$\gamma_{(G,sup)}$	g_d [kNm ⁻¹]
Kolejnice jeřábové dráhy	0,79	1,35	1,06
Vlastní tíha nosníku JD (odhad)	4,00	1,35	5,40
Vlastní tíha vodorovného nosníku a lávky (odhad)	1,50	1,35	2,03
Stálé zatížení celkem Σg	6,29		8,48

Obr. 44 Stálé zatížení nosníku JD

6.2.2 Proměnná zatížení

Tíha jeřábu

Program na základě vzorců a podmínek uvedených v kapitole 3.2.1.1 vyplní do tabulky požadované hodnoty (viz obr. 45).

Tabulka 2.2 a- Svislé síly- nezatížený jeřáb					
Svislé síly- nezatížený jeřáb	Ozn.	1. Jeřáb		2. Jeřáb	
Maximální zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu	$Q_{C,r,max}$	141,6	[kN]	104,42	[kN]
Doprovodné zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu	$Q_{(C,r,max)}$	96,4	[kN]	70,08	[kN]
Minimální zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu	$Q_{C,r,min}$	96,4	[kN]	70,08	[kN]
Doprovodné zatížení jedním kolem nezatíženého jeřábu	$Q_{(C,r,min)}$	141,6	[kN]	104,42	[kN]

Obr. 45 Proměnné zatížení – tíha jeřábu

Zatížení kladkostroje

Program na základě vzorců a podmínek uvedených v kapitole 3.2.1.2 vyplní do tabulky požadované hodnoty (viz obr. 46).

Tabulka 2.2 b- Svislé síly- zatížení kladkostroje						
Popis	Ozn.	1. Jeřáb		2. Jeřáb		ČSN EN 1991-3
Max. zat. od kola jeřábu způsobené zat. kladkostroje	$Q_{H,r,max}$	225,0	[kN]	145,4	[kN]	článek 2.5.2.1
Dopr. zat. od kola jeřábu způsobené zat. kladkostroje	$Q_{(H,r,max)}$	25,0	[kN]	14,6	[kN]	článek 2.5.2.1

Obr. 46 Proměnné zatížení – zatížení kladkostroje

Zrychlení mostu jeřábu

Pro výpočet je nezbytné, aby uživatel vyplnil do tabulky hodnotu součinitele tření (obr. 47). Doporučené hodnoty součinitelů, jež udává norma ČSN EN 1991-3, se objeví po označení pravého horního rohu zvýrazněné buňky myší. Podle postupů, které jsou popsány v kapitole 3.2.2.1, program vyplní zbývající buňky tabulky.

Tabulka 2.2 c- Vodorovné síly od zrychlení nebo zpomalení jeřábu						
Popis	Ozn.	1. Jeřáb		2. Jeřáb		ČSN EN 1991-3
Součinitel tření	μ	0,2	[-]	0,2	[-]	čl. 2.7.3(3)
Min. zatížení od kola nezatíženého jeřábu (tab.2.1)	$\Sigma Q_{r,min}^*$	192,8	[kN]	140,2	[kN]	čl. 2.7.3(3)
Hnací síla	K	38,6	[kN]	28,0	[kN]	čl. 2.7.3(3)
Podelná síla od rozjezdu jeřábu	$H_{L,1}=H_{L,2}$	19,3	[kN]	14,0	[kN]	čl. 2.7.2
Součet max. svislých zatížení na jedné větvi JD	$\Sigma Q_{r,max}$	733,2	[kN]	499,7	[kN]	viz tabulka 1.1 b
Součet max. svislých zatížení na obou větvích JD	ΣQ_r	976,0	[kN]	669,0	[kN]	viz tabulka 1.1 b
Součinitel	ζ_1	0,75	[-]	0,75	[-]	čl. 2.7.2(3)
Součinitel	ζ_2	0,25	[-]	0,25	[-]	čl. 2.7.2(3)
Vychýlení těžiště zatíženého jeř.	l_s	5,7	[m]	5,6	[m]	čl. 2.7.2 (3)
Moment hnací síly	M	218,0	[kNm]	155,7	[kNm]	čl. 2.7.2 (3)
Příčná síla od rozjezdu jeřábu	$H_{T,1}$	29,2	[kN]	25,8	[kN]	čl. 2.7.2 (3)
Příčná síla od rozjezdu jeřábu	$H_{T,2}$	9,7	[kN]	8,8	[kN]	čl. 2.7.2 (3)

Obr. 47 Proměnné zatížení – zrychlení mostu jeřábu

Příčení mostu jeřábu

Aby program pracoval správně, musí uživatel vyplnit následující 2 formuláře. Pomocí prvního je vypočítán úhel příčení nezbytný pro další výpočet (obr. 48). Uživatel má možnost zadat úhel konzervativně, nebo výpočtem podle normy[1] (viz kapitola 3.2.2.3).

Konzervativně Die ČSN EN 1991-3

1. Jeřáb 2. Jeřáb

úhel přičení $\alpha = 0,015$ [rad] úhel přičení $\alpha = 0,015$ [rad]

maximální hodnota 0,015 rad

Konzervativně Die ČSN EN 1991-3

1. Jeřáb 2. Jeřáb

mezera mezi vodícími prostředky $a_{ext} =$ [mm] $a_{ext} =$ [mm]

šířka hlavy kolejničky $b = 100$ [mm] $b =$ [mm]

pružný pokluz $x = 10$ [mm] $x =$ [mm]

opotřebovaná výška kolejničky $y = 75$ [mm] $y =$ [mm]

tolerance směru kol a kolejniček $\alpha_0 = 0,001$ [rad] $\alpha_0 =$ [rad]

Pozn. Při návrhu lze použít konzervativně reakci při přičení jako 0,3. A nebo tyto hodnoty 1993-3.

Úhly α_i	Minimální hodnoty α_i
$\alpha_f = 0,75 \cdot x$	$0,75 \cdot x \geq 5$ mm pro vodící kladky
$\alpha_{ext} = \frac{a_{ext}}{b}$	$0,75 \cdot x \geq 10$ mm pro nákolky kol
$\alpha_y = \frac{y}{a_{ext}}$	$y \geq 0,03 \cdot b$ [mm] pro vodící kladky
$\alpha_0 = 0,001$	$y \geq 0,10 \cdot b$ [mm] pro nákolky kol

Kde a_{ext} je mezera mezi vodícími kladkami nebo nákolky kol,
 b šířka hlavy kolejničky,
 x vůle mezi kolejnici a vodícími prostředky (příčný prokluz),
 y opotřebovaná výška kolejničky,
 α_0 tolerance směru kol a kolejniček.

Celkový úhel přičení $\alpha = \alpha_f + \alpha_y + \alpha_0 \leq 0,015$ rad
Součinitel reakce při přičení $f = 0,3(1 - e^{-250\alpha}) \leq 0,3$
Pozn. ČSN EN 1991-3 čl. 2.7.4

Načíst hodnoty

Obr. 48 Formulář pro výpočet úhlu přičení

Po otevření druhého formuláře uživatel vyplní požadované parametry a potvrdí tlačítkem “Načíst hodnoty” (obr. 49). Program nejprve vypočte součinitele sil, poté jejich výsledné vodorovné příčné a podélné složky. Tyto hodnoty vytiskne do připravené tabulky.

Zadání parametrů Obrázky

1. Jeřáb 2. Jeřáb

počet spojených dvojic kol $m = 2$ [-] $m = 2$ [-]

vzdálenost od středu otáčení (viz obr.) $e1 = 0$ [mm] $e1 = 0$ [mm]

$e2 = 4400$ [mm] $e2 = 4400$ [mm]

$\xi1 = 0,7513$ [-] $\xi1 = 0,747$ [-]

$\xi2 = 0,2488$ [-] $\xi2 = 0,2531$ [-]

počet dvojic kol $n = 2$ [-] $n = 2$ [-]

Uložení kol vzhledem k bočním pohybům IFF IFF

Načíst hodnoty

Uložení kol vzhledem k bočním pohybům	spojená (c)	nezávislá (i)
Pevný/Pevný FF		
Pevný/Pohyblivý FM		

Obr. 49 Formulář pro výpočet součinitelů sil

Zrychlení kočky

Podle vzorců (viz kapitola 3.2.2.2) jsou hodnoty ukládány do tabulky (obr. 50).

Tabulka 2.2 e- Vodorovné síly od zrychlení nebo zpomalení kočky					
Popis	Ozn.	1. Jeřáb		2. Jeřáb	
Příčné brzdící síly	$H_{T3,i}$	15,33	[kN]	10,10	[kN]
ČSN EN 1991-3 čl. 2.11.2(1)					

Obr. 50 Příčné síly od zrychlení nebo zpomalení kočky

Dynamické účinky

Načtení dynamických součinitelů $\varphi_1 - \varphi_5$ se provádí pomocí formuláře. Uživatel zadává hodnoty do připravených Textboxů. Na každém listě jsou uvedeny hodnoty součinitelů, jež doporučuje norma [6] (viz obr. 51).

The form is divided into two main sections for '1. Jeřáb' and '2. Jeřáb'. Each section has a 'Zadat hodnotu' button. The '1. Jeřáb' section includes input fields for φ_1 , φ_2 , $\varphi_{2,min}$, v_h , and φ_2 . The '2. Jeřáb' section includes similar fields. A table at the bottom provides reference values for different crane types (HC1 to HC4). The table is as follows:

Třída zvedacích zařízení	β_2	$\varphi_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

POZNÁMKA: Aby byly uváženy dynamické účinky při přemístění břemene ze země na jeřáb, jsou jeřáby zařazeny do tříd zdvihadel HC1 až HC4. Výběr závisí na konkrétním typu jeřábu, viz doporučení v příloze B.

Tabulka 2.4 v normě ČSN EN 1991-3

Načíst hodnoty

Obr. 51 Formulář pro načtení dynamických součinitelů

6.2.3 Únavové zatížení

Program vyplní tabulku (obr. 52) dle vzorců a podmínek uvedených v kapitole 3.5.

Tabulka 2.3-Únavové zatížení FAT						
Popis	Ozn.	1. Jeřáb		2. Jeřáb		Norma
Kategorie únavových účinků	S	S5	[-]	S5	[-]	tabulka B.1 ČSN EN 1991-3
Dynamický součinitel pro ekvivalentní poškození rázem	$f_{fat,1}$	1,05	[-]	1,05	[-]	viz rovnice (2.19) v ČSN EN 1991-3
	$f_{fat,2}$	1,06	[-]	1,07	[-]	
Součinitel ekvivalentního poškození (pro jeden jeřáb)	l_s	0,63	[-]	0,63	[-]	tabulka 2.12 V ČSN EN 1991-3
	l_t	0,76	[-]	0,76	[-]	
Součinitel ekvivalentního poškození (pro více jeřábů)	$l_{s,dup}$	0,397	[-]	0,40	[-]	viz 9.3.2. (5) ČSN EN 1993-6
	$l_{t,dup}$	0,575	[-]	0,58	[-]	
Součinitel ekvivalentního poškození (lokální účinky)	$l_{s,loc}$	0,794	[-]	0,79	[-]	viz 9.3.2. (4) ČSN EN 1993-6
	$l_{t,loc}$	0,871	[-]	0,87	[-]	
Maximální zatížení jedním kolem zatíženého jeřábu	$Q_{C,r,max}$	141,60	[kN]	104,42	[kN]	
	$Q_{H,r,max}$	225,0	[kN]	145,42	[kN]	
Ekvivalentní únavové zatížení jedním kolem zatíženého jeřábu	$Q_{e,s}$	244,5	[kN]	167,3	[kN]	viz rovnice (2.16) v ČSN EN 1991-3
	$Q_{e,t}$	294,2	[kN]	201,3	[kN]	
Ekvivalentní únavové zatížení (spolupůsobící jeřáby)	$Q_{e,s}$	154,1	[kN]	105,5	[kN]	
	$Q_{e,t}$	223,2	[kN]	152,7	[kN]	
Ekvivalentní únavové zatížení (lokální účinky)	$Q_{e,s}$	308,2	[kN]	210,9	[kN]	
	$Q_{e,t}$	338,0	[kN]	231,4	[kN]	

Obr. 52 Únavové zatížení

6.2.4 Dílčí součinitele zatížení


V programu byly přednastaveny dílčí součinitele zatížení. Má-li uživatel od dodavatele doporučené jiné hodnoty, může zvýrazněné buňky přepsat.

Tabulka 2.4- Dílčí součinitele			
Popis	Ozn.		Norma
Součinitel stálého zatížení	$\gamma_{(G,sup)}$	1,35	A.1.2(B)(CZ)-1 ČSN EN 1990
Součinitel proměnného zatížení	γ_Q	1,35	tab. A.1 ČSN EN 1993-1
Součinitel únavového zatížení	γ_{FF}	1,00	9.2(1) ČSN EN 1993-6

Obr. 53 Načtení dílčích součinitelů

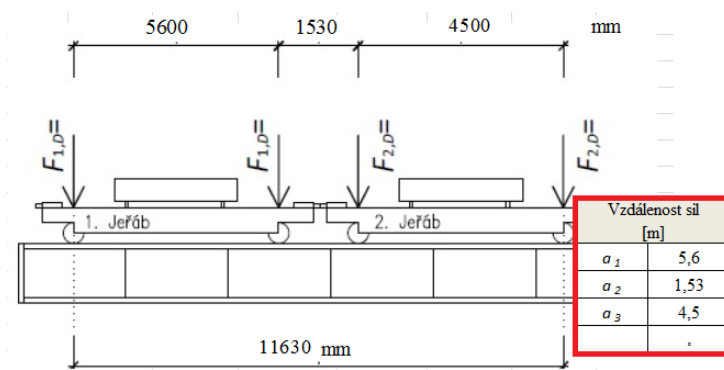
6.3 Výpočet vnitřních sil na nosníku JD

Po otevření listu “Síly-HN” program vypíše dynamické součinitele do kombinační tabulky. Tyto hodnoty bude dále načítat v závislosti na zvolené skupině zatížení. Tabulka, jež blíže popisuje vztahy mezi skupinami a dynamickými součiniteli, se otevře po kliknutí na zvýrazněné tlačítko (viz obr. 54).

3.2 Vnitřní síly- proměnná zatížení					Tabulka skupiny zatížení a dyn. Součinitelů 		
3.2.1 Skupiny zatížení							
Tabulka 3.2.1a- Skupiny zatížení s příslušnými dyn. součiniteli (1. jeřáb)							
Druh nahodilého zatížení	Značka	Skupina zatížení-MSÚ					
		1	2	3	4	5	6
Vlastní tíha jeřábu	Q_C	1,10	1,10	1	1,00	1,00	1,00
Zatížení kladkostroje	Q_H	1,13	1,00	•	1,00	1,00	1,00
Zrychlení mostu jeřábu	H_L, H_T	1,50	1,50	1,50	1,50	•	•
Příčení mostu jeřábu	H_S, S	•	•	•	•	1	•
Zrychlení kočky	H_{T3}	•	•	•	•	•	1

Obr. 54 Skupiny zatížení a dynamických součinitelů

Program, podle zadané geometrie a základních parametrů jeřábů, graficky znázorní zatěžovací schéma nosníku při působení jednoho, nebo dvou jeřábů. A načte hodnoty důležité pro výpočet do připravených tabulek (obr. 55).



Obr. 55 Zatěžovací schéma nosníku

Uživatel vybere pro jeřáb/y skupinu zatížení. Pro danou skupinu jsou vypočítány maximální svislé tlaky kol a vytisknuty do tabulky. Tyto hodnoty jsou určeny podle kombinačních vzorců uvedených v kapitole 3.7. Následně zvolí velikost kroku (čím menší hodnota, tím přesnější výpočet) a provede výpočet kliknutím na tlačítko (obr. 56).

A) Maximální posouvající síla

Tabulka 3.2.2 a1- Návrhové hodnoty maximálních svislých tlaků kol

1. Jeřáb				2. Jeřáb			
Skupina zatížení	Návrhová hodnota svislé síly			Skupina zatížení	Návrhová hodnota svislé síly		
1	$F_{1,D}$	552,91	[kN]	1	$F_{2,D}$	379,86	[kN]

Pozice síly	Velikost svislých sil [kN]	Vzdálenost sil [m]
1	$F_{1,D}$	552,91
2	$F_{1,D}$	552,91
3	$F_{2,D}$	379,86
4	$F_{2,D}$	379,86

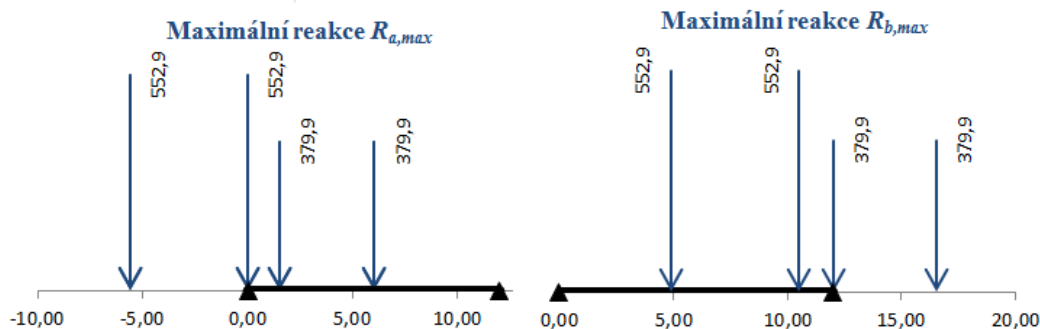
Velikost kroku: 1 mm Vypočítat Rmax Počet cyklů: 23630 (max 50000)

Parametry jeřábu Zatížení jeřábu Síly HN Návrh a posudek HN Posudek svárů MSP-HN Únava Svařované Válcov

Obr. 56 Výpočet maximální posouvající síly

Po ukončení výpočtu jsou hodnoty reakcí vytisknuty do příslušných buněk (obr. 57). Do buněk jsou ukládány nejen největší reakce na nosníku, vzniklé od pohyblivé soustavy břemen, ale i příslušné reakce a poloha sil, při níž byly dané extrémy vyvozeny. Jestliže se síla nachází mimo posuzovaný nosník, buňka se zbarví do červena. Dále program graficky znázorní postavení pohyblivé soustavy břemen vyvolující maximální reakce R_a a R_b .

Maximální reakce		Příslušná reakce		Poloha sil [m]			
				X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
$R_{a,F}$	1073,31 [kN]	$R_{b,F}$	239,31 [kN]	-5,60	0,00	1,53	6,03
Příslušná reakce		Maximální reakce		Poloha sil [m]			
				X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
$R_{a,F}$	399,01 [kN]	$R_{b,F}$	1086,65 [kN]	4,87	10,47	12,00	16,50



Obr. 57 Maximální reakce a postavení pohyblivé soustavy břemen

Aby proběhl výpočet, musí uživatel myší označit zvýrazněné tlačítko (obr. 58). Program pracuje tak, že simuluje pohyb jeřábu po nosníku. Pro každý krok vypočte a uloží hodnoty reakcí, posouvajících sil a ohybových momentů. Výsledné ohybové momenty porovná, zapamatuje si maximální hodnotu a vytiskne ji do připravené buňky v tabulce. Dále načte do tabulky příslušné síly, které byly vyvozeny postavením břemen při extrémním ohybovém momentu a polohu nejvíce namáhaného průřezu x_k . Pro ověření správnosti výpočtu slouží tlačítko “Winklerovo kritérium“. Tomuto tlačítku bylo přiděleno makro, pomocí něj proběhne výpočet, který určí, pod kterým kolem by měl vznikat maximální ohybový moment.

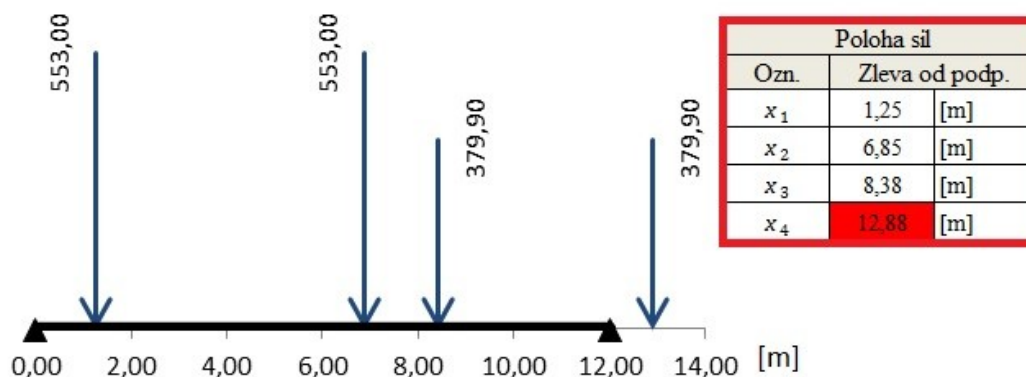
Tabulka 3.2.2 b- Maximální ohybový moment od kolových				
Popis	Hodnota			
Poloha průřezu max. ohyb. momentu	x_K	6,85	[m]	
Příslušná reakce v podpoře a	$R_{a,F}$	847,69	[kN]	
Příslušná reakce v podpoře b	$R_{b,F}$	637,98	[kN]	
Příslušná posouvající síla před průřezem	$V_{přísl.před}$	294,78	[kN]	
Příslušná posouvající síla za průřezem	$V_{přísl.za}$	-258,13	[kN]	
Maximální ohybový moment	$M_{max,F}$	2706,98	[kNm]	



Obr. 58 Výpočet maximálního ohybového momentu

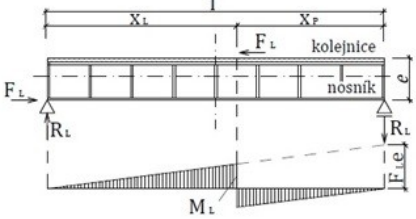
Dále program graficky znázorní postavení pohyblivé soustavy břemen vyvolující maximální ohybový moment $M_{max,F}$ (obr. 59).

Poloha svislých tlaků kol při maximálním momentu M_{max}



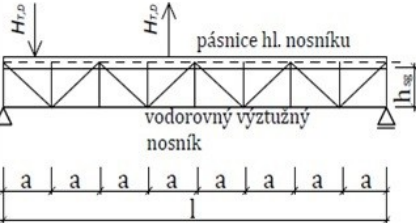
Obr. 59 Postavení pohyblivé soustavy sil vyvolující maximální ohybový moment

Podle zvolené skupiny zatížení jsou vypočteny vodorovné podélné síly zatěžující nosník jeřábové dráhy. Ze vztahů uvedených v kapitole 4.3 program stanoví vnitřních síly (normálové a posouvací). Aby došlo k výpočtu přídatného ohybového momentu, musí uživatel vyplnit vzdálenost posuzovaného průřezu. Ten se konzervativně volí v polovině délky nosníku, nebo v místě maximálního ohybového momentu (obr. 60).

Skupina zatížení	Návrhová hodnota síly			Skupina zatížení	Návrhová hodnota síly		
1	$H_{L,D} =$	39,04	[kN]	1	$H_{L,D} =$	28,38	[kN]
Popis		Hodnota		Poznámka			
Výška nosníku		$h_{nosník}$	800				
Výška kolejničky		$h_{kolejnice}$	100				
Excentricita		e	900				
Návrhová hodnota podélné		F_L	67,42				
Podporová reakce		R_L	5,06				
Posuzovaný průřez (zleva)		x_L	6000,00				
Ohybový moment		M_L	30	Vzdálenost posuzovaného průřezu. Konzervativně L/2			

Obr. 60 Podélné vodorovné síly

Program na základě skupiny zatížení určí a vytiskne maximální hodnotu příčné vodorovné síly pro daný jeřáb zatěžující zvolenou větev JD. Aby proběhl výpočet místního ohybového momentu M_T správně, musí uživatel předběžně navrhnout vzdálenost styčnicků vodorovného příhradového nosníku (obr. 61).

1. Jeřáb					2. Jeřáb				
Skupina z.	Větev	Návrhová hodnota síly			Skupina z.	Větev	Návrhová hodnota síly		
1	2	$H_{T,D} =$	19,61	[kN]	1	2	$H_{T,D} =$	17,74	[kN]
Popis		Hodnota			Poznámka				
Vzdálenost příčných výztuh	a	1500	[mm]						
Maximální příčná síla	$H_{T,D,max}$	19	Zadat celé číslo						
Místní normálová síla	$N_{T,D}$	0	[kN]						
Místní ohybový moment	M_T	5,88	[kNm]						
Pozn. Místní normálová síla bývá malá. Její účinky lze zanedbat. Popřípadě určit vlastním výpočtem.									

Obr. 61 Příčné vodorovné síly

Hodnoty potřebné pro posouzení nosníku podle mezních stavů únosností jsou uloženy do tabulky (obr. 62). Jestliže byly všechny hodnoty vyplněny, přejde uživatel na další list.

Zatížení	Postavení	N_{Ed}	$V_{z,Ed}$	$M_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$
		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
Stálé	postavení V_{max}	0,0	50,9	0,0	0,0
	postavení M_{max}	0,0	7,2	149,7	0,0
Svislá zatížení od kol jeřábu	postavení V_{max}	0,0	1086,7	0,0	0,0
	postavení M_{max}	0,0	294,8	2707,0	0,0
Vodorovná podélná síla		67,4	5,1	30,3	0,0
Vodorovné příčné síly		0,0	0,0	0,0	5,9

Obr. 62 Rekapitulace vnitřních sil na hlavním nosníku JD

6.4 Návrh a posouzení hlavního nosníku

Návrh profilu

Po otevření listu “Návrh a posudek HN” je možné načíst průřez pomocí rozbalovacích seznamů z vytvořené knihovny profilů (viz kapitola 5.1), nebo pomocí formuláře, který se otevře po kliknutí na tlačítko “Vlastní profil”. Uživatel vyplní potřebné rozměry a potvrdí kliknutím na “Načíst průřez” (obr. 63). Program z těchto údajů vypočítá průřezové charakteristiky potřebné pro výpočet a výsledky vytiskne do tabulky.

Diagram of a welded I-beam cross-section (Svařovaný nosník) showing dimensions: h (total height), b (flange width), t_w (web thickness), t_{f1} , t_{f2} (flange thicknesses), e_1 , e_2 (flange extension from web centerline), h_{w1} , h_{w2} (web height from flange centerline).

Obr. 63 Načtení profilu

Výběr použité oceli

Dalším krokem návrhu je výběr pevnostní třídy oceli (obr. 64). Uživatel vybírá ze 4 tříd (viz kapitola 5.2). Hodnoty napětí na mezi kluzu a pevnosti jsou tisknuty do připravených buněk. Kliknutím na zvýrazněné tlačítko je možné nahlédnout do tabulky s doporučenými napětími na mezi kluzu a pevnosti v tahu podle ČSN EN 1993-1-1 [1].

Table of yield strength (f_y) and tensile strength (f_t) for different steel grades (S235, S275, S355, S450) and cross-section types (Stojina, Horní pásnice, Spodní pásnice).

pevnostní třída	Stojina	Horní pásnice	Spodní pásnice
S235	235	235	235
S275	275	275	275
S355	355	355	355
S450	450	450	450

Diagram of an I-beam cross-section showing dimensions: h , b , t_w , t_{f1} , t_{f2} , e_1 , e_2 , h_{w1} , h_{w2} .

Obr. 64 Určení pevnostní třídy oceli

Zatřídění průřezu

Program má předdefinované dílčí součinitele materiálu podle normy ČSN EN 1991-3. Uživatel má na výběr, zda posouzení prosté pevnosti horní a spodní pásnice bude provedeno podle pružného, nebo plastického rozdělení normálového napětí (obr. 65) v závislosti na vypočtené třídě průřezu. Stojina je automaticky posuzována pružným výpočtem. Ve zvýrazněných buňkách jsou vypsány hodnoty využití horní a spodní pásnice při posouzení prosté pevnosti. Napětí jsou počítána pro průřez nejvíce namáhaný ohybovým momentem. Jsou zde zahrnuty účinky svislých tlaků kol a stálého zatížení. Zbylé složky nejsou do výpočtu zatím zařazeny. Proto je nezbytné zachovat větší rezervu využití.

-dílčí součinitele:				-předběžný posudek:			(ohyb)
γ_{M0}	1,00	[-]		Ohybové napětí	Využití		
γ_{M1}	1,00	[-]		Horní vlákno	50,9		[%]
γ_{M2}	1,25	[-]		Spodní vlákno	57,7		[%]
(nutno větší rezerva)							
Zatřídění průřezu: (viz tabulka 5.2 v ČSN EN 1993-1-1)							
-horní pásnice: Tlačená část				-stojina nosníku: Zatříděno pro ohyb			
$\varepsilon =$	0,92			$\varepsilon =$	0,9		
$c =$	192,50			$c =$	1128,0		
$c/t_{f1} =$	4,81	Průřez 1. třídy		$c/t_w =$	75,2	Průřez 2. třídy	
Jeřábovou dráhu řešíme pružnostně				Jeřábovou dráhu řešíme plasticky			

Obr. 65 Zatřídění průřezu

Posouzení pásnic v krajních vláknech nosníku

Posudek proveden v místě nejvíce namáhaném normálovým napětím $\sigma_{m,Ed}$ (tj. místo největšího ohybového momentu M_{Ed}). Únosnost průřezu při jednoosé napjatosti je ověřována podle podmínky spolehlivosti (45) pro krajní vlákna nosníku (obr. 66).

Popis	Hodnota			Poznámka		
Návrhový ohybový moment pod aritmeticky středním břemenem	M_{Ed}	2856,7	[kNm]	stále zat., užitné zatížení jeřáby(svislé i vodorovné)		
Průřezový modul pro horní vlákno	$W_{el,pl,1}$	2,04E+07	[mm ³]	pružný průřezový modul		
Průřezový modul pro spodní vlákno	$W_{el,pl,2}$	1,80E+07	[mm ³]	pružný průřezový modul		
Ohyb. normálové napětí v horním vlákně	$\sigma_{m,Ed}$	139,86	[MPa]	$M_{Ed}/W_{el,pl,1}$		
Ohyb. normálové napětí ve spodním vlákně	$\sigma_{m,Ed}$	158,77	[MPa]			
Podmínka spolehlivosti pro jednoosou napjatost	$\sigma_{m,Ed}$ [MPa]	\leq	f_{yk}/γ_{M0} [MPa]	Využití [%]	Posudek	Poznámka
pro horní vlákno	139,86	\leq	235,0	59,5	Vyhoví	(6.2.6(4) v ČSN EN
pro spodní vlákno	158,77	\leq	235,0	67,6	Vyhoví	1993-1-1)

Obr. 66 Posouzení pásnic v krajních vláknech nosníku při normálovém napětí

Posouzení stojiny v neutrální ose průřezu při maximálním smykovém napětí

Posouzení je provedeno v podporovém průřezu, nejvíce namáhaném smykovým napětím $\tau_{v,Ed}$ od návrhové posouvající síly V_{Ed} . Posouzení je provedeno pomocí podmínky spolehlivosti (48). Posudek a využití průřezu jsou vytisknuty do zvýrazněných buněk (obr. 67).

Popis	Hodnota			Poznámka
Maximální návrhová hodnota posouvající síly v podporovém průřezu	V_{Ed}	1144,9	[kNm]	stále zat., užité zatížení jeřáby (svislé i vodorovné)
Statický moment části průřezu nad těžišťovou osou y	S_y	1,07E+07	[mm ³]	výpočet podle vztahu
Moment setrvačnosti průřezu k ose y	I_y	1,15E+10	[mm ⁴]	
Tloušťka stojiny	t_w	15,0	[mm]	
Smykové napětí	$\tau_{v,Ed}$	71,2	[MPa]	
Podmínka spolehlivosti pro jednoosou napjatost	τ_{Ed} [MPa]	≤	$f_y/\sqrt{3}\gamma_{Mo}$ [MPa]	Využití [%] Posudek Poznámka
$\tau_{Ed} \leq f_y/\sqrt{3}\gamma_{Mo}$	71,25	≤	135,7	52,5 Vyhoví (6.2.6(4) v ČSN EN 1993-1-1)

Obr. 67 Posouzení stojiny v neutrální ose průřezu při maximálním smykovém napětí

Posouzení stojiny při interakci napětí

Interakce napětí se posuzuje v rozhodujících průřezích nosníku. Tedy v průřezu, ve kterém působí maximální ohybový moment a v průřezu u podpory, kde působí největší posouvající síla. Účinky proměnného zatížení jsou počítány pro postavení pohyblivé soustavy břemen M_{max} , resp. postavení V_{max} . Při posouzení pro postavení břemen vyvolující maximální ohybový moment jsou složky vnitřních sil a lokální zatížení dosazovány do výpočtu automaticky. Naopak při posouzení pro postavení břemen vyvolující maximální posouvající sílu má možnost uživatel zvolit posuzovanou podporu v závislosti na velikosti osamělého břemene (viz obr. 55), (obr. 68).

Maximální reakce vyvolaná kolovým zatížením	R_F	<div> <div>Ra,F</div> <div>Ra,F</div> <div>Rb,F</div> </div>	[kN]	viz list "Siky-HN"
Maximální hodnota posouvající síly v podporovém průřezu	V_{Ed}	1131,52	[kNm]	stále zat., užité zatížení jeřáby (svislé i vodorovné)
Statický moment horní pásnice k těžišťové ose y	$S_{f1,y}$	8,67E+06	[mm ³]	Výpočet podle vztahu
Tloušťka stojiny	t_w	15,00	[mm]	
Moment setrvačnosti průřezu k ose y	I_y	1,15E+10	[mm ⁴]	
Globální smykové napětí	$\tau_{v,Ed}$	56,99	[MPa]	
Hodnoty lokálních napětí	Hodnota			Poznámka
Kolo vyvolující maximální reakci		2		viz list "Siky-HN"

Obr. 68 Výběr reakce a osamělého břemene

Výpočty jednotlivých napětí jsou vypsány do přehledné tabulky. Pro výpočet lokálního ohybového napětí od krouticího momentu je nutné, aby uživatel uvedl předběžný návrh vzdálenosti příčných výztuh (obr. 69). Během návrhu může uživatel kdykoliv hodnotu přepsat v závislosti na výsledcích následujících posouzení.

Vzdálenost příčných výztuh (odhad)	a	1500	[mm]	
Moment tuhosti v prostém kroucení horní pás.	$I_{fL,t}$	8,00E+06	[mm ⁴]	
Návrhová hodnota kolového zatížení	F_{Ed}	552,91	[kN]	
Excentricita kolového zatížení	e	25	[mm]	viz 2.5.2.1(2) ČSN EN 1991-3
Součinitel	η	0,505	[-]	viz 5.7.3(1) ČSN EN 1993-6
Krouticí moment způsobený	T_{Ed}	13,82	[kNm]	způsoben příčnou excentricitou
Lokální ohybové napětí	$\sigma_{T,Ed}$	57,75	[MPa]	

Obr. 69 Lokální ohybové napětí

Únosnost stojiny při dvouosé napjatosti je ověřena podle podmínky spolehlivosti (66).

Výsledek posouzení a využití průřezu jsou rovněž vypsány do tabulky (obr. 70).

Podmínka spolehlivosti pro dvouosou napjatost	[-]	\leq	[-]	Posudek	Poznámka
$(\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3\tau_{Ed}^2)(\gamma_{M0}/f_y)^2 \leq 1$	0,59	\leq	1,0	Vyhoví	(6.2.1(5) v ČSN EN 1993-1-1)

Obr. 70 Posouzení stojiny při dvouosé napjatosti

Posouzení pásnic při kombinaci se svislými i vodorovnými silami

Posudek je proveden v místě nejvíce namáhaném normálovým napětím $\sigma_{x,Ed}$, při postavení břemen vyvolující maximální ohybový moment. Program provede posouzení únosnosti podle podmínky spolehlivosti (45) pro horní i spodní krajní vlákno (obr. 71).

Podmínka spolehlivosti pro jednoosou napjatost	$\sigma_{x,Ed}$ [MPa]	\leq	f_y/γ_{M0} [MPa]	Využití [%]	Posudek	Poznámka
pro horní vlákno	148,99	\leq	235,0	63,4	Vyhoví	(6.2.6(4) v ČSN EN 1993-1-1)
pro spodní vlákno	162,68	\leq	235,0	69,2	Vyhoví	

Obr. 71 Posouzení pásnic v krajních vláknech nosníku pro kombinaci se svislými i vodorovnými silami

Posouzení hlavního nosníku JD na klopení

Posouzení se provádí podle postupů a vzorců, jež jsou uvedeny v kapitole 5.4.5. Uživatel vyplní vzpěrnou délku tlačení pásu (obr. 72). Dále má v rozbalovacím seznamu na výběr z pěti křivek vzpěrnosti (a_0 až d). Podle zvolených parametrů program provede výpočet vzpěrné únosnosti a posouzení podle podmínky (72).

Část tlačené stojiny $h_w \cdot x$	x	0,2	[-]	doporučeno $h_w/5$
Plocha konvenčního tlačného pásu	A_{cz}	1,94E+04	[mm ²]	
Moment setrvačnosti konvenčního tlač. pásu	I_{cz}	2,13E+08	[mm ⁴]	
Návrhová vzpěrná únosnost pásu	Hodnota			Poznámka
Vzpěrná délka tlačného pásu	L_c	1500	[mm]	vzdálenost styčnicku vodorovného výztužného nosníku
Mez kluzu	f_y	235	[Mpa]	
Modul pružnosti v tahu a tlaku	E	210000	[Mpa]	
Poměrná štíhlost pásu	$\bar{\lambda}_f$	0,15	[-]	
Křivka vzpěrnosti		c		
Součinitel imperfekce	α	0,49	[-]	viz odst. 6.3.1.2 ČSN EN 1993-1-1
Součinitel	ϕ	0,50	[-]	
Součinitel vzpěrnosti	χ	1,000	[-]	
Návrhová vzpěrná únosnost pásu	$N_{c,b,Rd}$	4555,24	[kN]	viz odst. 6.3.1.1 ČSN EN 1993-1-1
Maximální ohybový moment	$M_{Ed,y}$	2900,49	[kN]	stále, užité zat. (svislé, vododor.)
Vzdálenost těžišť pásnic	x_T	1164	[mm]	
Tlaková síla konvenčního pásu	$N_{T,max}$	2491,83	[kN]	$M_{Ed,y}/x_T$

Posouzení hlavního nosníku JD na klopení	$N_{T,max}$ [kN]	≤	$N_{c,b,Rd}$ [kN]	Využití [%]	Posudek	Poznámka
$N_{T,max} \leq N_{c,b,Rd}$	2491,83	≤	4555,2	54,7	Vyhoví	6.2.6(4) v ČSN EN 1993-1-1

Obr. 72 Posouzení nosníku JD na klopení

Posouzení hlavního nosníku JD na boulení

Program podle zadaných parametrů (obr. 73) nejprve vypočte jednotlivé únosnosti (viz kap. 5.4.6).

Príspevek stojín	Hodnota			Poznámka
Koncové výztuhy-(v miestech podpor)	netuhé			viz odst. 5.1(2) ČSN EN 1993-1-5
Mezilehlé výztuhy-(v poli)	tuhé			
Vzdálenost medzi priečnymi výztuhami	$a =$	1500	[mm]	
Stranový pomer	α	1,33	[-]	$\alpha \geq 1$
Součinitel kritického napětí	k_τ	7,60	[-]	viz A.3(1) ČSN EN 1993-1-5
Umístění příčných výztuh	Nad podporami i v poli			

Účinná roznášecí délka	l_{eff}	287,9	[mm]	viz tabulka 4.2.3 a2	
Roznášecí délka příčného zatížení	s_s	207,9	[mm]	viz 6.5.2(1) ČSN EN 1993-6	
Bezrozměrné parametry	m_1	26,7	[-]	viz 6.5(1) ČSN EN 1991-3-5	
Bezrozměrné parametry	$\bar{\lambda}_f > 0,5$	☉	$\bar{\lambda}_f \leq 0,5$		○
	m_2	15,90	[-]		
Únosnost na místní zatížení	Hodnota			Poznámka	
Typ zavedení zatížení	Typ (a)				

Obr. 73 Únosnosti průřezu a související parametry

Uživatel zadává vzdálenost posuzovaného průřezu. Posouzení se provádí pro dva případy postavení pohyblivé soustavy břemen (viz kapitola 5.4.6). Po vyvolání procedury jsou určeny příslušné vnitřní síly a graficky znázorněno postavení břemen (obr. 74). Program dále provede jednotlivá posouzení.

Popis			Hodnota			Poznámka
Vzdálenost průřezu od příčné výztuhy na více namáhané straně pole			$a_m =$	564	[mm]	Doporučení $a_m = \min(0,4a ; 0,5h_w)$ (viz 4.6.(3) ČSN EN 1993-1-5)
Vzdálenost posuz. Průřezu od levé podpory			x_l	937	[mm]	
Krok	1	[mm]	Maximální ohybový moment			Maximální posouvající síla
Poloha vyvolující maximální ohybový moment v posuzovaném průřezu						
Poloha sil		Příslušná síla				
Ozn.	[m]	Ozn.	[kN]			
x_1	-4,66	$F_{1,D}$	552,91			
x_2	0,94	$F_{1,D}$	552,91			
x_3	2,47	$F_{2,D}$	379,86			
x_4	6,97	$F_{2,D}$	379,86			

Obr. 74 Posouzení nosníku na boulení

Návrh a posouzení koncové výztuhy

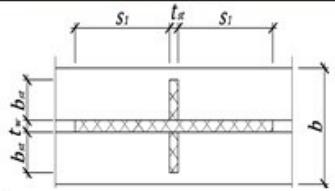
Koncová výztuha se posuzuje na vzpěr jako tlačенý prut, přenášející reakci v podpoře nosníku (viz kapitola 5.4.7.2). Uživatel nadefinuje rozměry výztuhy a určí křivku vzpěrné únosnosti (viz ob. 75). Program vypočte vzpěrnou únosnost a dosadí do podmínky spolehlivosti (98).

Šířka jedné výztuhy	b_{st}	120,00 [mm]	
Tloušťka výztuhy	t_{st}	16 [mm]	
Vzdálenost příčné výztuhy od kraje nosníku	s_0	10 [mm]	
Šířka pásnice hlavního nosníku	b	400 [mm]	
Tloušťka stojiny hlavního nosníku	t_w	15 [mm]	
Spolupůsobící šířka stojiny	s_1	225 [mm]	
Vzpěrná délka výztuhy	l_{stcr}	846 [mm]	viz 9.4(2) ČSN EN 1993-1-5
Poměrná štíhlost výztuhy	$\bar{\lambda}_{st}$	0,17 [-]	viz 6.3.1.3.(1) ČSN EN 1993-1-1
Křivka vzpěrné pevnosti	4	c	doporučena křivka vzpěrnosti c

Obr. 75 Načtení parametrů koncové výztuhy

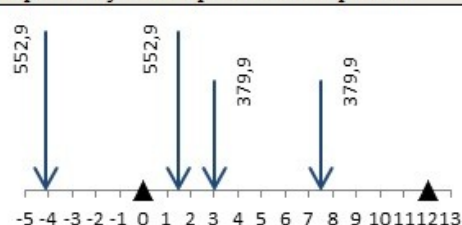
Návrh a posouzení mezilehlé výztuhy

Uživatel nejprve načte potřebné parametry (obr. 76). Program podle zadaných parametrů nejprve ověří tuhost výztuhy (viz kapitola 5.4.7.2).

Rozměry výztuhy	Hodnota			Poznámka
Šířka jedné výztuhy	b_{st}	120,00	[mm]	
Tloušťka výztuhy	t_{st}	10	[mm]	
Šířka pásnice hlavního nosníku	b	400	[mm]	
Tloušťka stojiny hlavního nosníku	t_w	15	[mm]	
Spolupůsobící šířka stojiny	s_1	225	[mm]	
Vzpěrná délka výztuhy	l_{cr}	846	[mm]	viz 9.4(2) ČSN EN 1993-1-5
Poměrná štíhlost výztuhy	λ_{st}	0.23	[-]	viz 6.3.1.3.(1) ČSN EN 1993-1-1
Křivka vzpěrné pevnosti		c		doporučena křivka vzpěrnosti c

Obr. 76 Načtení parametrů mezilehlé výztuhy

Poté uživatel zvolí vzdálenost posuzované výztuhy a vyvolá proceduru (obr. 77) pomocí níž program určí osovou sílu ve výztuze, na kterou ji následně posoudí dle podmínky spolehlivosti (111).

Vzdálenost posuzované příčné výztuhy od levé podpory	x_i	1500	[mm]	
(Poznámka-Nejvíce namáhané výztuhy jsou krajní)				
Krok	1	[mm]	Výpočet	
Poloha sil vyvolující maximální posouvající sílu v posuzovaném průřezu				
Poloha sil	Příslušná síla			
Ozn.	[m]	Ozn.	[kN]	
x_1	-4,10	$F_{1,D}$	552,91	
x_2	1,50	$F_{1,D}$	552,91	
x_3	3,03	$F_{2,D}$	379,86	
x_4	7,53	$F_{2,D}$	379,86	

Obr. 77 Výpočet osové síly v mezilehlé výztuze

Posouzení účinného podepření tlačené pásnice stojinou

Poslední posouzení na tomto listě (obr. 78) provede program automaticky, bez jakéhokoliv zadávání.

Popis	Hodnota			Poznámka
Součinitel pro tlačnou pásnici	k	0,3	[-]	Průřez 1.třídy
Modul pružnosti v tahu a tlaku	E	210000	[MPa]	
Mez kluzu	f_y	235	[MPa]	
Plná plocha stojiny	A_w	16920	[mm ²]	
Účinná plocha tlačené pásnice	A_{fc}	16000	[mm ²]	
Podmínka spolehlivosti	[-]	≤	[-]	Posudek
$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{kE}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$	75,2	≤	275,7	Vyhoví
				viz odstavec 8(1) v ČSN EN 1993-1-5

Obr. 78 Posouzení účinného podepření tlačené pásnice stojinou

6.5 Posouzení spoje stojiny a pásnice nosníku (krčních svarů)

Krční svary pod horní pásnicí nosníku

Na listu "Návrh svaru" jsou naprogramovány vzorce a postupy popsané v kapitole 5.4.8. Po otevření listu uživatel nejprve z rozbalovacích seznamů vybere pro jakou reakci a hodnotu kolového zatížení budou počítány jednotlivé složky napětí ve svarech (obr. 79).

Působení sil	Hodnota			Poznámka
Maximální reakce vyvozená kolovým zatížením	<input type="text" value="Ra,F"/>			viz list "Síky-HN"
	R_F	1073,3	[kN]	
Návrhová hodnota kolového zatížení nad posuzovanou podporou	<input type="text" value="1"/>			viz list "Síky-HN"
	F_{Ed}	552,9	[kN]	
Reakce od stálého zatížení	R_G	50,9	[kN]	

Obr. 79 Výběr reakce a kolového zatížení

Následně navrhne účinnou tloušťku svaru. Uživatel má možnost započítat tloušťku stojiny při výpočtu napětí ve svarech (obr. 80). Tím docílí efektivnějšího návrhu, neboť svary poté přenášejí menší napětí.

Účinná tloušťka svaru	a	16	[mm]	
Smykový tok	\mathcal{V}	1003,1	[Nmm ⁻¹]	
Vodorovné napětí ve svarech od V_{Ed}	τ_{II}^1	31,3	[MPa]	
Lokální svislé tlakové napětí	$\sigma_{sz,Ed}$	128,0	[MPa]	viz 5.7.1(1) v ČSN EN 1993-6
Přičtení tloušťky stojiny	<input checked="" type="radio"/> ANO		<input type="radio"/> NE	

Obr. 80 Návrh svaru

Po zadání všech parametrů program provede posouzení dle podmínek spolehlivosti (113), (114).

Podmínka spolehlivosti	Podmínka [MPa]	≤	Podmínka [MPa]	Posudek	Poznámka
$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$	33,57	≤	288,0	Vyhoví	viz čl. 4.5.3.2 v ČSN EN 1993-1-8
$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$	100,73	≤	360,0	Vyhoví	

Obr. 81 Posouzení svaru pod horní pásnicí

Krční svary nad spodní pásnicí nosníku

Krční svary nad spodní pásnicí přenášejí jenom smykové napětí od posouvající síly. Uživatel navrhne tloušťku svaru. Program vybere maximální hodnotu posouvající síly, vypočte smykové napětí a posoudí podle podmínky spolehlivosti (113), (114).

6.6 Mezní stav použitelnosti – hlavní nosník JD

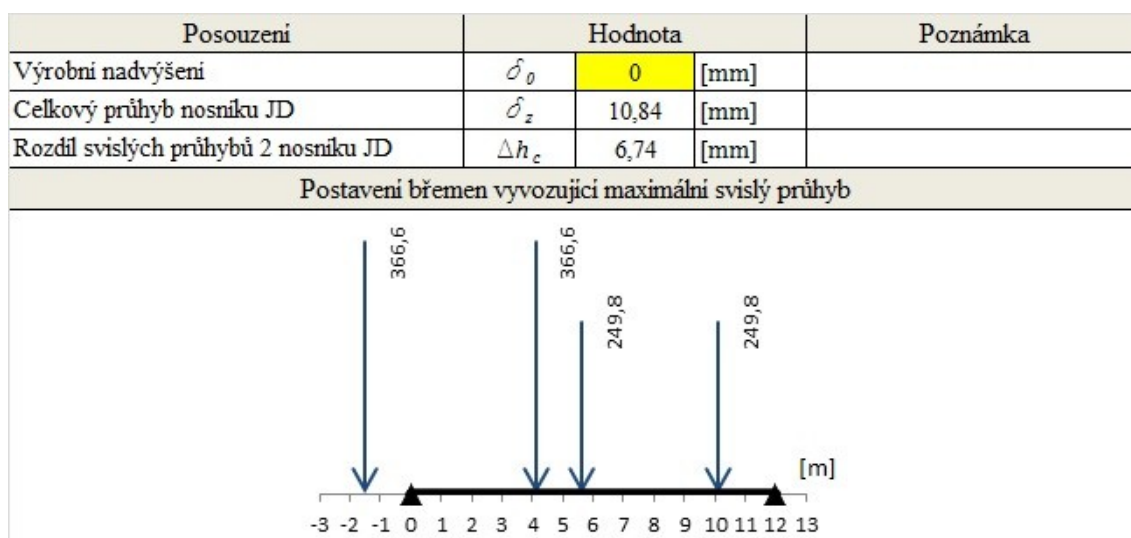
Svislé průhyby

Posouzení nosníku dle mezních stavů použitelnosti je na listu “MSP HN“. Pomocí procedury (viz příloha B) jsou počítány průhyby na obou větvích jeřábové dráhy (maximálně a minimálně zatížené). Uživatel vyvolá proceduru kliknutím na zvýrazněné tlačítko (obr. 76).

Velikost kroku	1	[mm]	Vypočítat průhyb	(Uprostřed nosníku)
Celkové průhyby		Hodnota		Poznámka
Průhyb vyvolaný maximálními svislými tlaky kol na hlavní větví JD		$\delta_{F,max}$	10,14 [mm]	
Průhyb vyvolaný minimálními svislými tlaky kol na hlavní větví JD		$\delta_{F,(max)}$	3,40 [mm]	
Průhyb od stálého zatížení		δ_g	0,70 [mm]	

Obr. 82 Výpočet průhybu

Uživatel má možnost zadat případné výrobní nadvýšení nosníku (obr. 83). Program také vykreslí postavení pohyblivé soustavy břemen, při kterém byl maximální průhyb vyvozen.



Obr. 83 Postavení pohyblivé soustavy břemen vyvolující maximální průhyb

Vypočtené hodnoty průhybů jsou ověřeny podle podmínek spolehlivosti (viz kapitola), (obr. 78).

Podmínka spolehlivosti	δ_z [mm]	\leq	δ_{zCd} [mm]	Posudek	Poznámka
Maximální svislý průhyb	10,84	\leq	20,00	Vyhoví	tabulka 7.2 ČSN EN 1993-6
Podmínka spolehlivosti	Δh_c [mm]	\leq	Δh_{cCd} [mm]	Posudek	Poznámka
Rozdíl svislých průhybů	6,74	\leq	37,5	Vyhoví	tabulka 7.2 ČSN EN 1993-6

Obr. 84 Posouzení svislých průhybů

Štíhlost stojiny

Dále je ověřena podmínka mezní štíhlosti stojiny (134),(obr. 85).

Podmínka spolehlivosti	[-]	\leq	[-]	Posudek	Poznámka
Mezní štíhlost stojiny	75,20	\leq	120	Vyhoví	viz 7.4(3) ČSN EN 1993-6

Obr. 85 Omezení dýchání stojiny

Štíhlost spodní pásnice

Po zadání potřebné hodnoty program provede posouzení podle podmínky spolehlivosti (135),(obr. 86).

Popis	Hodnota		Poznámka
Vzdálenost příčných podpor spod.pásnice	L_t	3000 [mm]	
Poloměr setrvačnosti spodní pásnice	i_{tz}	115,47 [mm]	ve vodorovné rovině
Podmínka spolehlivosti	[-]	\leq	[-]
Mezní štíhlost pásnice	25,98	\leq	250
			Vyhoví
			viz 7.6(2) ČSN EN 1993-6

Obr. 86 Mezní štíhlost spodní pásnice

6.7 Únava

Únavová pevnost

Po otevření listu “Únava“ musí uživatel nejprve zadat dílčí součinitel spolehlivosti, jež se volí podle důsledků porušení konstrukce a použité metody (viz kap. 5.6). Kliknutím na zvýrazněné tlačítko se otevře se formulář s doporučenými hodnotami uvedenými v normě ČSN EN 1993-1-9 (obr. 81). Dále zadává referenční únavové pevnosti posuzovaných částí průřezu. Pro usnadnění návrhu byly vytvořeny formuláře, které obsahují úryvky z tabulek 8.1-8.10 normy [10] potřebné pro zařazení průřezu do kategorie detailu. Po vyplnění všech hodnot přejde k posouzení jednotlivých částí.

Dílčí souč. spolehlivosti únavové pevnosti	γ_{Mf}	1,35	[-]	tabulka 3.1	ČSN EN 1993-1-9 tabulka 3.1
Referenční únavová pevnost horní pásnice	$\Delta\sigma_c$	80	[MPa]	tabulka č.	Tabulky ČSN EN 1993-1-9
Referenční únavová pevnost dolní pásnice	$\Delta\sigma_c$	112	[MPa]	tabulka č.	Tabulky ČSN EN 1993-1-9
Referenční únavová pevnost pro posouzení stojiny	$\Delta\sigma_c$	80	[MPa]	tabulka č.	Tabulky ČSN EN 1993-1-9
Referenční únavová pevnost krčních koutových svárů	$\Delta\tau_c$	80	[MPa]	tabulka č.	přenaší smyk. tok od posouvající Tabulky ČSN EN 1993-1-9
Referenční únavová pevnost krčních koutových svárů	$\Delta\sigma_c$	36	[MPa]	tabulka č.	přenaší svislé tlakové napětí od Tabulky ČSN EN 1993-1-9

Obr. 87 Zatřídění detailu do příslušné kategorie

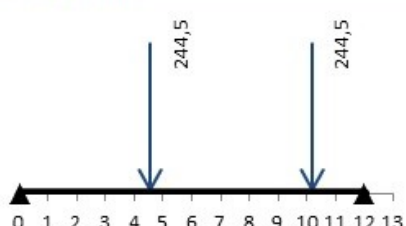
Pomocí programu lze provést následující posouzení.

Posouzení pásnic pro rozkmit normálového napětí od ohybového momentu

Maximální rozkmit ohybového momentu od ekvivalentního zatížení únavou je určen pro pohyblivou soustavu břemen vyvoláním procedury. Výpočet proběhne po kliknutí na zvýrazněné tlačítko (obr. 88). Hodnoty maximálního rozkmitu ohybového momentu a postavení sil, jež jej vyvolaly, jsou vytisknuty do připravených buněk.

Ekvivalentní zatížení pro poškození únavou	$Q_{e,\sigma}$	244,49	[kN]	1. jeřáb působící samostatně
Ekvivalentní rozkmit ohybového momentu	$\Delta M_{E,1}$	862,29	[kNm]	Vypočet
Vzdálenost sil	a	5,6	[m]	

Postavení sil při maximálním momentu			
Poloha sil		Příslušná síla	
Ozn.	[m]	Ozn.	[kN]
x_1	4,60	$F_{1,1}$	244,51
x_2	10,20	$F_{1,2}$	244,51



Obr. 88 Výpočet ekvivalentního rozkmitu ohybového momentu

Program provede výpočet únavového poškození pro krajní vlákna nosníku a posouzení podle podmínky spolehlivosti (136), (obr. 89).

Únavové poškození						
Podmínka spolehlivosti	[-]	≤	[-]	Posudek	Využití	Poznámka
$D_{\sigma 1} = \gamma_{Ff}^{-2} (\Delta\sigma_{E,1})^2 \left(\frac{\gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_c}\right)^2 \leq 1$	0,36	≤	1	Vyhoví	0,71	pro horní vlákno
Únavové poškození						
Podmínka spolehlivosti	[-]	≤	[-]	Posudek	Využití	Poznámka
$D_{\sigma 1} = \gamma_{Ff}^{-2} (\Delta\sigma_{E,2})^2 \left(\frac{\gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_c}\right)^2 \leq 1$	0,19	≤	1	Vyhoví	0,58	pro spodní vlákno

Obr. 89 Posouzení únavové pevnosti

Je-li jeřábová dráha zatěžována dvěma jeřáby, musí uživatel postup opakovat. Tedy vyvolat proceduru pro výpočet únavového poškození od druhého jeřábu a obou jeřábů současně. Program následně provede posouzení pro lineární kumulaci těchto únavových poškození podle podmínky spolehlivosti (145), (obr. 90).

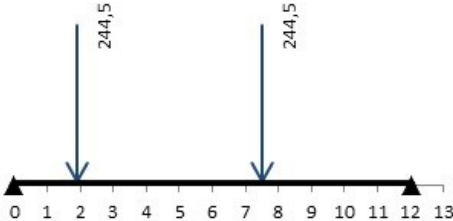
Popis	Hodnota			Rozkmit napětí		Poznámka
Únavové poškození	$D_{\sigma,1}$	0,19	[-]	$\Delta\sigma_{E2,1}$		pro spodní pásnici
	$D_{\sigma,2}$	0,09	[-]	$\Delta\sigma_{E2,2}$		
	$D_{\sigma,dup}$	0,13	[-]	$\Delta\sigma_{E2,dup}$		
Podmínka spolehlivosti-horní pás.	[-]	≤	[-]	Posudek	Využití	Poznámka
$D_{\sigma,1}+D_{\sigma,2}+D_{\sigma,dup} \leq 1$	0,41	≤	1	Vyhoví	0,74	viz 9.4.2 ČSN EN 1993-6

Obr. 90 Posouzení únavové pevnosti pro lineární kumulaci únavových poškození

Posouzení stojiny pro rozkmit hlavního napětí od ohybového momentu a posouvající síly

Posouzení je provedeno pro detail ukončení svarového spoje příčné výztuhy nad spodní pásnicí, který přenáší maximální rozkmit napětí. S ohledem na minimalizaci vrubových účinků se níže výztuha nepřivařuje. Nejprve uživatel vyplní vzdálenost výztuhy, která je nejvíce namáhána rozkmitem ohybového napětí (obr. 91). Pro tuto vzdálenost jsou pomocí procedury vypočítány rozkmit posouvající síly a ohybového momentu. Dále je potřeba zadat výšku nepřivařené části výztuhy, z níž je určena z-ová souřadnice posuzovaného detailu. Poté jsou vypočteny rozkmit hlavního napětí a proveden posudek podle podmínek spolehlivosti (136), (145).

Ekvivalentní zatížení pro poškození únavou	$Q_{e,\sigma}$	244,49	[kN]	1. jeřáb působící samostatně
Vzdálenost posuzovaného řezu	x_k	7500	[mm]	zleva od podpory
Ekvivalentní rozkmit ohybového momentu	$\Delta M_{E,1}$	861,83	[kNm]	Vypočet
Ekvivalentní rozkmit posouvající síly	$\Delta V_{E,1}$	191,52	[kN]	
Vzdálenost sil	a	5,6	[m]	

Postavení sil při maximálním momentu v daném průřezu				
Poloha sil		Příslušná síla		
Ozn.	[m]	Ozn.	[kN]	
x_1	1,90	$F_{1,1}$	244,49	
x_2	7,50	$F_{1,2}$	244,49	

Popis	Hodnota		Poznámka
Výška nepřivařené části stojiny	x_{st}	150	viz obr. a
Z-ová souřadnice posuzovaného detailu	z	456,0	

Obr. 91 Výpočet rozkmitů ohybového momentu a posouvající síly

Posouzení krčních svarů pro rozkmit smykového napětí od posouvající síly

Posouzení se provádí v místě největšího rozkmitu posouvající síly (tj. podporový průřez). Program opět počítá s možností působení jednoho nebo dvou jeřábů. Pro výpočet maximálního rozkmitu posouvající síly, způsobené pohyblivou soustavou břemen byla vytvořena procedura, jež uživatel vyvolá kliknutím na tlačítko (obr. 92). Posouzení jsou opět provedena pro jednotlivá únavová poškození a pro jejich lineární kumulaci.

Ekvivalentní zatížení pro poškození únavou	$Q_{e, \sigma, dup}$	223,15	[kN]	1. Jeřáb působící současně
Ekvivalentní zatížení pro poškození únavou	$Q_{e, \sigma, dup}$	152,73	[kN]	2. Jeřáb působící současně
Ekvivalentní rozkmit ohybového momentu	$\Delta V_{E, dup}$	437,98	[kNm]	Vypočet
Vzdálenost sil	a_1	5,6	[m]	viz list "síly HN"
	a_2	1,53	[m]	
	a_3	4,5	[m]	

Postavení sil při maximálním momentu			
Poloha sil		Příslušná síla	
Ozn.	[m]	Ozn.	[kN]
x_1	4,87	$F_{1,1}$	223,15
x_2	10,47	$F_{1,2}$	223,15
x_3	12,00	$F_{2,1}$	152,73
x_4	16,50	$F_{2,2}$	152,73

The diagram illustrates the distribution of four vertical loads along a horizontal beam. The beam is marked with a scale from 0 to 18. The loads are represented by downward-pointing arrows. The first load, with a magnitude of 223,10, is positioned at 4,87. The second load, with a magnitude of 223,1, is positioned at 10,47. The third load, with a magnitude of 152,7, is positioned at 12,00. The fourth load, with a magnitude of 152,7, is positioned at 16,50. The beam is supported by a pin support at 0 and a roller support at 12,00.

Obr. 92 Výpočet rozkmitu posouvající síly od pohyblivé soustavy břemen

Posouzení krčních svarů pro rozkmit svislého tlakového napětí od tlaků kol

Program ověří únavovou pevnost podle přednastavených parametrů automaticky. Uživatel již žádné hodnoty nezadáva. Výstupem je ověření únavové pevnosti (kapitola 5.6.6),(obr. 93).

Únavové poškození					
Podmínka spolehlivosti (viz 9.4.2 ČSN EN 1993-6)	[-]	≤	[-]	Posudek	Využití
$D_{\sigma} = \gamma_{ff}^3 (\Delta \sigma_{Evert, E2,1}^3 + \Delta \sigma_{Evert, E2,2}^3) \left(\frac{\gamma_{mf}}{\Delta \sigma_e} \right)^3 \leq 1$	0,94	≤	1	Vyhoví	0,98

Obr. 93 Posouzení krčních svarů pro rozkmit svislého tlakového napětí od tlaků kol

7 Závěr

V rámci diplomové práce byl odvozen algoritmus pro návrh a posudek nosníku jeřábové dráhy pro jeden a dva jeřáby podle současně platných norem. V programu vytvořená aplikace provádí výpočet zatížení, vnitřních sil působících na hlavní nosník, návrh průřezu a vhodného materiálu pro jeho výrobu. Po zadání potřebných parametrů program uskuteční posouzení pevnosti průřezu, klopení nosníku, boulení štíhlých stěn podle mezních stavů únosnosti, ověření mezních stavů použitelnosti a únavy. Do budoucna bude možno program rozšířit o další uživatelsky přínosné funkce (např. návrh vodorovného výztužného nosníku). Součástí práce je příručka, jež usnadňuje práci s uvedeným programem. Funkčnost programu byla ověřena porovnáním výsledků výpočtu s řešením stejných jeřábových drah uvedených v literatuře. Diplomová práce obsahuje také popis jednotlivých druhů jeřábů, jeřábových drah a jejich součástí. Byly zde vytvořeny knihovny základních průřezů JD a jeřábových kolejnic. V práci jsou v ní popsány jednotlivé postupy výpočtu JD pro mostové jeřáby.

Práce s prezentovaným programem usnadňuje a zrychluje statický výpočet hlavního nosníku jeřábové dráhy a tím umožňuje jeho efektivnější návrh. Při jeho vytváření jsem si prohloubil znalosti v oblasti posuzování ocelových konstrukcí. Rovněž jsem si osvojil spoustu dalších užitečných dovedností, zdokonalil jsem se v programování v jazyku VBA.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se podíleli na tvorbě této diplomové práce. Především děkuji paní Ing. Lausové Lence, Ph.D. za odbornou pomoc, ochotu, věcné konzultace a trpělivost, kterou se mnou měla.

8 Použité zdroje

8.1 Seznam použité literatury

- [1] ČSN 27 0005 *Ilustrovaný slovník jeřábů a těžkých zdvihadel*. Praha: ČNI, 1993.
- [2] ČSN 27 0140 *Jeřáby a zdvihadla. Projektování a konstruování* (6 částí). Praha: Vydavatelství ÚNM, 1986.
- [3] ČSN 42 5678 *Kolejnice pro jeřábové dráhy z oceli třídy 10, válcované za tepla. Rozměry*. Praha: ÚNMZ, 1981.
- [4] ČSN EN 1990 (73 0002) *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha, ČNI, 2004.
- [5] ČSN EN 1991-1-1 (73 0035) *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: ČNI, 2004.
- [6] ČSN EN 1991-3 (73 0035) *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 3: Zatížení od jeřábů a strojního vybavení*. Praha: ČNI, 2008.
- [7] ČSN EN 1993-1-1 (73 1401) *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2004.
- [8] ČSN EN 1993-1-5 (73 1401) *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn*. Praha: ČNI, 2008.
- [9] ČSN EN 1993-1-8 (73 1401) *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčníků*. Praha: ČNI, 2006.
- [10] ČSN EN 1993-1-9 (73 1401) *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-9: Únava*. Praha: ČNI, 2006.
- [11] ČSN EN 1993-6 (73 1460) *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 6: Jeřábové dráhy*. Praha: ČNI, 2006.
- [12] ISO 16881 *Crane – Design calculation for rail wheels and associated trolley track supporting structure – Part 1: General*. Geneve: ISO, 2005.
- [13] *Jeřáby*. [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.iteco.cz>

- [14] Kadlčák, J. *Stavební mechanika I. Přehled teorie a příklady*, Brno, VUT, 1982, 272 s.
- [15] *Mostové jeřáby*. [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z:
<http://podyemnik.all.biz/cs/mostove-jeřaby-podperne-g2973794>
- [16] *Otočné jeřáby*. [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z:
<http://www.cevas.cz/cz/nabidka/jeřabova-technika/lehke-jeřaby/>
- [17] *Pevnost štíhlých stěn*. [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z:
http://www.fce.vutbr.cz/KDK/pilgr.m/BO02/BO02_cvi_12.pdf
- [18] Pilgr, M. *Kovové konstrukce. Výpočet jeřábové dráhy pro mostové jeřáby podle ČSN EN 1991-3 a ČSN EN 1993-6*. Brno: CERM, 2012, 200 s.
- [19] *Portálové jeřáby*. [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z:
<http://www.krantechnik.cz/portalove-jeřaby>

8.2 Použité programy

MS Excel 2010

AutoCad 2014 (Czech)

9 Seznam použitých obrázků a tabulek

9.1 Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Podvěsný jeřáb [13].....</i>	<i>5</i>
<i>Obr. 2 Otočný jeřáb [16]</i>	<i>5</i>
<i>Obr. 3 Mostový jeřáb [15]</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 4 Konzolový jeřáb [13]</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 5 Portálový jeřáb [19]</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 6 Mostový jeřáb [6]</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 7 Průjezdový profil</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 8 Jeřábové dráhy z válcovaných profilů.....</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 9 Složený nosník jeřábové dráhy [18]</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 10 Galeriový nosník.....</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 11 Uzavřený průřez jeřábové dráhy</i>	<i>10</i>
<i>Obr. 12 Schéma profilované kolejnice</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 13 Způsoby připojení kolejnice k horní pásnici.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 14 Typizovaný nárazník jeřábových drah z normy ČSN 27 0005 [1].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 15 Uspořádání zatíženého jeřábu při maximálním zatížení JD [6].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 16 Uspořádání nezatíženého jeřábu při minimálním zatížení nosníku JD [6]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 17 Uspořádání podélných a příčných vodorovných sil od rozjezdu.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 18-Uspořádání příčných brzdných sil [6]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 19 Síly od přičení jeřábů [6].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 20 Výslednice brzdných sil podélného pojezdu obou jeřábů</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 21 Vodorovný výztužný nosník a průřez hlavního nosníku JD</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 22 Rekapitulace vnitřních sil na nosníku JD</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 23 Průřez nosníku JD</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 24 Tabulka průřezových charakteristik</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 25 Lokální tlakové, smykové a ohybové napětí pod kolovým zatížením [11]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 26 Průřez přenášející příčnou sílu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 27 Průřez konvexního tlačného pásu</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 28 součinitel kritické síly pro různé typy zavedení zatížení [8]</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 29 Postavení soustavy břemen pro posouzení stojiny.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 30 Příčné výztuhy (zleva: koncová, mezilehlá)</i>	<i>46</i>

<i>Obr. 31 Nejvíce namáhané mezilehlé výztuhy.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 32 Vtlačení pásnice do stojiny [17]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 33 Vodorovná napětí ve svarech [18].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 34 Svislá napětí v krčních koutových svarech [18]</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 35 Mezní hodnoty průhybů</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36 příčinková čára průhybu uprostřed rozpětí prostého nosníku.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37 Detaily náchylné k poškození únavou</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 38 Nepřivařená část příčné výztuhy.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 39 Geometrie jeřábu</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 40: Základní parametry jeřábu.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 41 Konstrukční parametry jeřábu.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 42 Formulář pro načtení kolejnice</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 43 Parametry kolejnice potřebné pro výpočet.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 44 Stálé zatížení nosníku JD</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 45 Proměnné zatížení – tíha jeřábu</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 46 Proměnné zatížení – zatížení kladkostroje.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 47 Proměnné zatížení – zrychlení mostu jeřábu</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 48 Formulář pro výpočet úhlu přičení.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 49 Formulář pro výpočet součinitelů sil.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 50 Příčné síly od zrychlení nebo zpomalení kočky</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 51 Formulář pro načtení dynamických součinitelů</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 52 Únavové zatížení.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 53 Načtení dílčích součinitelů.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 54 Skupiny zatížení a dynamických součinitelů</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 55 Zatěžovací schéma nosníku.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 56 Výpočet maximální posouvající síly.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 57 Maximální reakce a postavení pohyblivé soustavy břemen.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 58 Výpočet maximálního ohybového momentu.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 59 Postavení pohyblivé soustavy sil vyvozující maximální ohybový moment.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 60 Podélné vodorovné síly.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 61 Příčné vodorovné síly</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 62 Rekapitulace vnitřních sil na hlavním nosníku JD</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 63 Načtení profilu</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 64 Určení pevnostní třídy oceli.....</i>	<i>74</i>

<i>Obr. 65 Zatřídění průřezu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 66 Posouzení pásnic v krajních vláknech nosníku při normálovém napětí</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 67 Posouzení stojiny v neutrální ose průřezu při maximálním smykovém napětí</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 68 Výběr reakce a osamělého břemena</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 69 Lokální ohybové napětí.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 70 Posouzení stojiny při dvouosé napjatosti.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 71 Posouzení pásnic v krajních vláknech nosníku pro kombinaci se svislými i vodorovnými silami</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 72 Posouzení nosníku JD na klopení</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 73 Únosnosti průřezu a související parametry</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 74 Posouzení nosníku na boulení.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 75 Načtení parametrů koncové výztuhy</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 76 Načtení parametrů mezilehlé výztuhy</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 77 Výpočet osově síly v mezilehlé výztuze</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 78 Posouzení účinného podepření tlačené pásnice stojinou</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 79 Výběr reakce a kolového zatížení.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 80 Návrh svaru.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 81 Posouzení svaru pod horní pásnicí.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 82 Výpočet průhybu</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 83 Postavení pohyblivé soustavy břemen vyvolující maximální průhyb</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 84 Posouzení svislých průhybů</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 85 Omezení dýchání stojiny</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 86 Mezní štíhlost spodní pásnice</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 87 Zatřídění detailu do příslušné kategorie.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 88 Výpočet ekvivalentního rozkmitu ohybového momentu</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 89 Posouzení únavové pevnosti</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 90 Posouzení únavové pevnosti pro lineární kumulaci únavových poškození.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 91 Výpočet rozkmitů ohybového momentu a posouvající síly.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 92 Výpočet rozkmitu posouvající síly od pohyblivé soustavy břemen</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 93 Posouzení krčních svarů pro rozkmit svislého tlakového napětí od tlaků kol</i>	<i>86</i>

9.2 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Knihovna jeřábových kolejnic kolejnice</i>	<i>11</i>
<i>Tabulka 2 Druhy dynamických součinitelů</i>	<i>25</i>

<i>Tabulka 3 Skupiny zatížení a dynamických součinitelů uvažovaných jako jedno charakteristické zatížení od jeřábu. [6]</i>	25
<i>Tabulka 4 Jmenovité hodnoty meze kluzu f_y a pevnosti f_u v tahu [7]</i>	31
<i>Tabulka 5 Účinná roznášecí délka l_{eff} [11]</i>	35
<i>Tabulka 6 Součinitel příspěvku stojiny χ_w k únosnosti v boulení při smyku [8]</i>	41
<i>Tabulka 7 Kategorie detailů pro posouzení na únavu</i>	57

10 Seznam příloh

1. Příloha A: Řešený příklad
2. Příloha B: Výpis zdrojových kódů modulů v jazyku VBA